



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VLIV PRACOVNÍ POLOHY SVĚTELNÉHO ZDROJE NA FOTOMETRICKÉ PARAMETRY

THE EFFECT OF OPERATING POSITION OF THE LIGHT SOURCE ON THE PHOTOMETRIC
PARAMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB ŠŤASTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAN ŠKODA, PH.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky a
komunikačních technologií**

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jakub Šťastný

ID: 153255

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Vliv pracovní polohy světelného zdroje na fotometrické parametry

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte literární rešerši dané problematiky.
2. Pokuste se vytipovat zajímavé světelné zdroje, u kterých je předpoklad silné závislosti na pracovní poloze.
3. Tyto zdroje proměřte a ověřte předpoklady.
4. Učiňte závěry a pokuste se navrhnout doporučení k provozu světelných zdrojů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ: Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

ŠŤASTNÝ, J. *Vliv pracovní polohy světelného zdroje na fotometrické parametry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Vliv pracovní polohy světelného zdroje na fotometrické parametry

Jakub Šťastný

Vedoucí: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

The effect of operating position of the light source on the photometric parameters

by

Jakub Št'astný

Supervisor: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Brno University of Technology, 2015

Brno

ABSTRAKT

Práce pojednává o vlivu pracovní polohy a okolní teploty na elektrické světelné zdroje. Pro uvedené účely práce obsahuje rozbor světelného záření, popis a princip měření světelných veličin. Dále je v ní uveden princip funkce, konstrukce a parametry světelných zdrojů. Pro každý světelný zdroj je uveden předpokládaný vliv pracovní polohy světelného zdroje a vliv změny okolní teploty na vyzařovaný světelný tok světelných zdrojů. Pro vybrané světelné zdroje je provedeno proměření vlivu pracovní polohy na jejich fotometrické parametry. Výstupy měření jsou porovnány s teoretickými předpoklady. Závěr popisuje doporučení pro provoz světelných zdrojů s ohledem na teoretickou i praktickou část práce.

KLÍČOVÁ SLOVA: záření; světelný zdroj; světelný tok; intenzita osvětlenosti; jas; pracovní poloha; okolní teplota; teplotní světelné zdroje; výbojové světelné zdroje; výboj; luminofor; elektroluminiscenční světelné zdroje

ABSTRACT

The theses discusses how operating position and ambient temperature affect electric light sources. For the purposes of this theses, the analysis of light radiation, the description and the principle of taking measurements of light quantities are included. The work also contains the principle of function, construction and parameters of light sources. For each light source a hypothesized impact of the operating position of the light source and the impact of ambient temperature variation on radiated luminous flux are stated. For selected light sources a measurement of the impact of the operating position on the sources' photometric parameters was taken. The output measurement data are being compared to the theoretical hypotheses. The conclusion of the thesis describes suggested recommendations for the operation of light sources based on both theoretical and practical parts of the thesis.

KEY WORDS:

radiation; light source; luminous flux; intensity of illumination; luminance; working position; ambient temperature; thermal light sources; discharge lamps; discharge; phosphor; electroluminescent light sources

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD.....	14
1.1 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	14
2 SVĚTLO.....	15
2.1 ZÁŘENÍ.....	15
2.1.1 ULTRAFIALOVÉ ZÁŘENÍ (UV).....	15
2.1.2 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ (IR).....	16
2.1.3 VIDITELNÉ ZÁŘENÍ.....	16
2.2 ZPRACOVÁNÍ ZÁŘENÍ.....	16
2.3 ZRAKOVÝ SYSTÉM	17
2.3.1 STAVBA OKA.....	17
2.3.2 ČINNOST OKA.....	18
2.3.3 AKOMODACE A ADAPTACE OKA	18
2.3.4 ZRAKOVÁ POHODA	19
3 FOTOMETRICKÉ VELIČINY	20
3.1 SVĚTELNÝ TOK.....	20
3.2 PROSTOROVÝ ÚHEL	20
3.3 SVÍTIVOST.....	21
3.4 OSVĚTLENOST	21
3.5 JAS.....	22
3.5.1 KONTRAST JASU.....	22
3.6 SVĚTLENÍ.....	22
3.7 ROVNOMĚRNOST OSVĚTLENOSTI A JASU	23
3.8 CHROMATIČNOST	23
3.9 VŠEOBECNÝ INDEX PODÁNÍ BAREV	23
3.10 MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH VELIČIN.....	23
3.10.1 MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI	23
3.10.2 MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO TOKU	24
3.10.3 MĚŘENÍ JASU	25
3.10.4 MĚŘENÍ ČAR SVÍTIVOSTI.....	25
4 SVĚTELNÉ ZDROJE	27
4.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	27
4.1.1 MĚRNÝ VÝKON SVĚTELNÝCH ZDROJŮ.....	27

4.1.2 NÁHRADNÍ TEPLOTA CHROMATIČNOSTI	27
4.1.3 ŽIVOTNOST SVĚTELNÉHO ZDROJE	27
4.2 TEPLOTNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE	28
4.2.1 OBYČEJNÉ ŽÁROVKY	29
4.2.2 VLIV TEPLoty A POLOHY NA PARAMETRY OBYČEJNÝCH ŽÁROVEK	29
4.2.3 HALOGENOVÉ ŽÁROVKY	30
4.2.4 VLIV TEPLoty A POLOHY NA PARAMETRY HALOGENOVÝCH ŽÁROVEK	31
4.3 VÝBOJOVÉ SVĚTELNÉ ZDROJE	31
4.3.1 NÍZKOTLAKÉ VÝBOJOVÉ ZDROJE	32
4.3.2 VYSOKOTLAKÉ VÝBOJOVÉ ZDROJE	37
4.4 ELEKTROLUMINISCENČNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE	41
4.4.1 SVĚTELNÉ DIODY LED	41
4.4.2 VLIV TEPLoty A POLOHY NA SVĚTELNÉ DIODY	41
4.5 URČENÍ NEJVHODNĚJŠÍCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ PRO ZKOUMÁNÍ VLIVU PRACOVNÍ POLOHY NA ZMĚNU FOTOMETRICKÝCH PARAMETRŮ	42
5 PRAKTICKÁ ČÁST	43
5.1 ZKOUMÁNÍ VLIVU ZMĚNY PRACOVNÍ POLOHY NA LINEÁRNÍ ZÁŘIVKU T5	43
5.1.1 MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO TOKU ZÁŘIVKY V KULOVÉM INTEGRÁTORU	43
5.1.2 MĚŘENÍ JASU A SNÍMÁNÍ ZMĚNY ROZLOŽENÍ TEPLoty ZA POMOCI GONIOFOTOMETRU	44
5.1.3 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH CHARAKTERISTIK PRO ZKOUMANOU LINEÁRNÍ ZÁŘIVKU	49
5.2 ZKOUMÁNÍ VLIVU ZMĚNY PRACOVNÍ POLOHY NA HALOGENIDOVOU VÝBOJKU	49
5.2.1 MĚŘENÍ JASU A SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA ZA POMOCI GONIOFOTOMETRU	49
5.2.2 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH CHARAKTERISTIK PRO ZKOUMANOU HALOGENIDOVOU VÝBOJKU	53
5.3 MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO TOKU OBYČEJNÉ ŽÁROVKY	53
5.3.1 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ	53
6 ZÁVĚR	55
6.1 SHRNUtÍ POZNATKŮ A DOPORUČENÍ K PROVOZU SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	55
6.2 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU	56
POUŽITÁ LITERATURA	57
SEZNAM PŘÍLOH	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Přehled záření [3]</i>	15
<i>Obr. 2-2 Řez okem[6]</i>	18
<i>Obr. 3-1 Prostorový úhel [1]</i>	20
<i>Obr. 3-2 Teplota chromatičnosti [4]</i>	23
<i>Obr. 3-3 Vnitřní uspořádání integračního kulového fotometru [1]</i>	25
<i>Obr. 3-4 Goniofotometr s otočným zdrojem a pevným fotometrem [7]</i>	26
<i>Obr. 4-1 Rozdělení umělých světelných elektrických zdrojů [1]</i>	28
<i>Obr. 4-2 Teplotní světelné zdroje a) halogenová žárovka OSRAM CLASIC ECO SUPERSTAR A [10], b) obyčejná 100 W žárovka [11]</i>	29
<i>Obr. 4-3 Rozložení teploty na povrchu rozsvícené obyčejné žárovky v závislosti na její poloze [12]</i>	30
<i>Obr. 4-4 Předpokládaná závislost světelného toku žárovky na poloze [13]</i>	30
<i>Obr. 4-5 Nízkotlaké výbojové světelné zdroje a) lineární zářivka PHILIPS [17], b) kompaktní zářivka PHILIPS [17], c) sodíková výbojka Master SOX-E T50 [17], d) indukční výbojka OSRAM [18]</i>	32
<i>Obr. 4-6 Závislost světelného toku zářivky na okolní teplotě [1]</i>	34
<i>Obr. 4-7 Závislost světelného toku zářivek různých typů T na okolní teplotě uvedená v katalogu PHILIPS [17]</i>	34
<i>Obr. 4-8 Závislost světelného toku kompaktní zářivky na okolní teplotě (modrá křivka - standardní provedení, oranžová křivka - provedení s amalgámem india) [1]</i>	35
<i>Obr. 4-9 Závislost světelného toku kompaktní zářivky na teplotě a) svislá poloha patice nahore, b) svislá poloha patice dole (upravený [20])</i>	36
<i>Obr. 4-10 Závislost světelného toku kompaktní zářivky na příkonu a teplotě a) svislá poloha patice nahore, b) svislá poloha patice dole (upravený [20])</i>	36
<i>Obr. 4-11 Vysokotlaké výbojové zdroje a) rtuťová výbojka PHILIPS [17], b) halogenidová výbojka PHILIPS [27], c) sodíková výbojka PHILIPS [27]</i>	38
<i>Obr. 4-12 Závislost vyzařovaného světelného toku diod různých vyzařovaných spekter na teplotě PN přechodu [1]</i>	42
<i>Obr. 5-1 Závislost poměrného světelného toku zářivky na její pracovní poloze</i>	44
<i>Obr. 5-2 Rozmístění přístrojů pro snímání jasu a změny rozložení teploty lineární zářivky (1.termokamera, 2.fotoaparát Nikon D90, 3. zkoumaný objekt, 4. goniofotometr)</i>	45
<i>Obr. 5-3 Závislost provozní teploty trubice na poloze lineární zářivky</i>	45

<i>Obr. 5-4 Rozložení teploty na povrchu trubice lineární zářivky v základních pracovních polohách</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5-5 Závislost poměrného jasů v řezu lineární zářivky v závislosti na poloze</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5-6 Rozmístění přístrojů pro snímání jasů a změny rozložení spektra halogenidové výbojky (1.fotoaparát Nikon D90, 2.spektrometr UPRTEK MK 356, 3. zkoumaný objekt, 4. goniofotometr).....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 5-7 Závislost poměrného světelného toku na pracovní poloze halogenidové výbojky.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5-8 Změna průběhu spektra halogenidové výbojky v závislosti na pracovní poloze</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5-9 Závislost poměrného jasů na pracovní poloze halogenidové výbojky.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5-10 Změna průběhu výboje halogenidové výbojky v závislosti na pracovní poloze</i>	<i>52</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Rozložení barev ve viditelném spektru [4].....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 4-1 Porovnání parametrů tepelných světelných zdrojů [1],[14]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4-2 Porovnání parametrů nízkotlakých výbojových zdrojů [1],[14]</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4-3 Porovnání parametrů vysokotlakých výbojových světelných zdrojů [1],[14]</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 5-1 Rozložení jasů v řezu lineární zářivky v závislosti na její pracovní poloze.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5-2 Světelný tok obyčejné žárovky 150 W</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 5-3 Světelný tok kompaktní zářivky 65 W (hodnoty převzaty z [25]).....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 5-4 Světelný tok proměřených zářivek v základních pracovních polohách (hodnoty převzaty z [25]).....</i>	<i>54</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
A	plocha	m^2
A_o	rozsah akomodace oka	D
d_h	průměr hořáku	m
E	intenzita osvětlenosti	lx
f	frekvence záření	Hz
I	svítivost	cd
K	kontrast jasu	-
L_a	jas předmětu	$\text{cd} \cdot \text{m}^2$
L_b	jas pozadí	$\text{cd} \cdot \text{m}^2$
l_h	vzdálenost mezi elektrodami v hořáku	m
L_{OP}	jas ve směru osy OP	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
M	světlení	lm m^2
P	elektrický příkon	W
r	vzdálenost	m
R_a	index podání barev	-
s	spektrální citlivost	-
T_c	teploty chromatičnosti	K
W_{ef}	efektivní energie	J
W_{dop}	zářivá energie	J
α	úhel naklonění svítidla	°
β	úhel, který svírá dopadající paprsek s normálou plochy	°
λ	vlnová délka	m
Φ	světelný tok	lm
$\Phi_{e\ dop}$	zářivý tok	lm
η_p	měrný světelný výkon	$\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$
ϑ	teplota	°C
Ω	prostorový úhel	sr

<i>IR</i>	infračervené záření	-
<i>LED</i>	Light Emiting Diode	-
<i>UV</i>	ultrafialové záření	-

1 ÚVOD

Světelné záření je nedílnou součástí každodenního života člověka. Nejdůležitějším světelným zdrojem je slunce, bez něj by nemohl existovat život. Nevýhoda slunečního záření je, že nám slouží jako světelný zdroj v průměru pouze polovinu dne. S postupným rozvojem lidské civilizace člověk dospěl do fáze, kdy potřebuje světelnou energii nejen ve dne, ale i v noci nebo potřebuje osvětlit místa, kam sluneční svit nedosáhne, tak začal vytvářet první umělé světelné zdroje. Pro dané zařízení využil technologické procesy, které mu byly známy už z pravěkých dob. Tato první osvětlovací zařízení fungovala na principu hoření. Typickým příkladem využívaným stovky možná i tisíce let je obyčejná louče. S postupným technickým pokrokem se tyto světelné zdroje zdokonalovaly. Už nemůžeme hovořit pouze o loučích, ale o svíčkách, petrolejových lampách, karbidových svítilnách a tak dále, ale neustále se využívá základního principu hoření.

Bod zlomu nastal s objevením a popsáním elektrické energie v devatenáctém století. V roce 1879 Thomas Alva Edison představil světu první světelný zdroj využívající ke své funkci elektrickou energii, a to žárovku. Od té doby začal a stále pokračuje vývoj světelných zdrojů využívajících elektrickou energii. Mezi nejznámější představitele této skupiny patří obyčejné žárovky, výbojky a světelné diody. Postupem času vznikl prakticky celý vědní obor zabývající se elektrickými světelnými zdroji a osvětlováním, kterým rozumíme schopnost navržení správného osvětlení za daných podmínek. Pro schopnost navržení správného osvětlení nebo pro možnost dalšího vývoje elektrických světelných zdrojů je důležité pochopit princip jejich funkce za různých podmínek. Každý elektrický světelný zdroj má své určité fotometrické parametry, ty se mohou se změnou jejich polohy měnit. Cílem této práce je zjistit, jak moc se parametry změní a zda tato změna bude ovlivňovat jejich funkčnost.

1.1 Cíl bakalářské práce

Cílem dané práce je zkoumání vlivu pracovní polohy světelných zdrojů na fotometrické parametry. Pro daný cíl je potřeba v první řadě vytvořit teoretické podklady zkoumané problematiky. Tyto podklady musí zahrnovat rozebrání fyzikální podstaty záření, rozbor fotometrických veličin a popsání metod měření fotometrických veličin. Dále je potřeba popsat umělé světelné zdroje, a to jejich princip funkce, základy konstrukce a předpokládaný vliv oteplení a změny polohy na jejich fotometrické parametry.

Další část je zaměřena na určení vhodných světelných zdrojů, u kterých bude největší předpoklad změny fotometrických parametrů v závislosti na pracovní poloze. Tento výběr bude závislý na pracovních, fyzikálních a rozměrových vlastnostech světelných zdrojů. Pro takto vytipované zdroje bude stěžejní navrhnout správný typ měření určitých parametrů a v návaznosti na tato měření se pokusit odvodit změny ostatních fotometrických parametrů.

Konečný výstup této práce je určení nejvhodnějšího provozu světelných zdrojů. Tento výstup je zacílen jak na proměřené světelné zdroje, tak i světelné zdroje v teoretické oblasti.

2 SVĚTLO

Hlavní funkcí světelných zdrojů je vydávat světelné záření. Pro přesnější pochopení řešené problematiky je zapotřebí si blíže rozebrat světelné záření z fyzikálního pohledu, popsat si jeho způsob zpracování a jeho působení na lidský smyslový systém.

2.1 Záření

Zářením nebo také radiací rozumíme přenos energie prostorem v podobě elektromagnetických vln nebo hmotných částic. Současný pohled na elektromagnetické záření je takový, že nemáme pevně stanovenou hranici mezi vlnovým charakterem elektromagnetického záření a zářením korpuskulárním, u kterého dochází k přenosu energie za pomoci částic [1].

V světelné technice se neuvažuje o podstatě elektromagnetického záření, ale sleduje se v určitých časových úsecích rozdělení toků energií mezi jednotlivými body v prostoru. Z tohoto pohledu můžeme libovolné záření rozložit na složky se sinusovým průběhem. Tyto složky jsou charakterizovány kmitočtem nebo vlnovou délkou. Kmitočet nebo také frekvence je rovna počtu kmitů za jednu sekundu. Frekvence se značí f a její jednotkou je Herz (Hz). Vlnová délka je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se shodnou fází a závisí na rychlosti šíření záření. Vlnová délka se značí λ a její jednotkou je metr (m). Jedná-li se o záření o jediném kmitočtu, nazýváme je monofrekvenční záření. Přehled seřazených záření podle vlnových délek a kmitočtu je na Obr. 5-1 [3], tímto seřazením se získá takzvané spektrum záření. Z pohledu světelných zdrojů je nejdůležitější viditelné záření, infračervené a ultrafialové záření, proto si tyto druhy záření blíže rozebereme [1],[2].



Obr. 2-1 Přehled záření [3]

2.1.1 Ultrafialové záření (UV)

Jedná se o záření, které se ve spektru nachází přibližně v rozsahu 400 nm až asi 1 nm. Zdrojem UV záření může být slunce, nebo i umělé světelné zdroje například rtuťové výbojky. UV záření o vysoké intenzitě je škodlivé pro lidskou kůži a může způsobovat rakovinu. Některé materiály působením UV záření rychleji stárnou a ztrácejí svojí mechanickou pevnost. Kovy i obyčejné sklo dokáží UV záření odstínit. Proto baňky výbojek pro osvětlování, které jsou vyrobeny ze skla, propouštějí zanedbatelné množství UV záření.

UV záření dokáže vybudit luminiscenci luminoforu, to je vyzařování světelné energie působením jiného druhu energie. Využívá se například k fluorescenční analýze, ta umožňuje vizuálně rozlišit dva materiály, které se od sebe za normálních podmínek neliší. Dále se UV záření využívá ve zdravotnictví a v zemědělství [1].

2.1.2 Infračervené záření (IR)

Jedná se o záření, které se ve spektru nachází přibližně v rozsahu 780 nm až asi do 1 mm. Pro IR záření jsou typické tepelné vlastnosti. IR záření vyzařuje nejen slunce, teplá tělesa, elektrický oblouk, ale i speciální světelné zdroje, kterým se říká infražárovky.

IR záření se využívá k vytápění a sušení díky tomu, že je nosičem sálavého tepla. Dále se využívá například ve zdravotnictví. Dokáže proniknout pokožkou a rozšiřuje cévy, tím zrychluje hojivý proces [1].

2.1.3 Viditelné záření

Za viditelné záření považujeme záření, které dokáže prostřednictvím zrakového orgánu vytvořit zrakový vjem. Spektrální rozsah viditelného záření není pevně určen, pro spodní hranici se udává v rozmezí 360 nm až 380 nm, pro horní hranici se udávají meze od 760 nm až 830 nm. Tyto vlnové délky přibližně odpovídají frekvencím od $7,7 \cdot 10^{14}$ Hz až po $3,9 \cdot 10^{14}$ Hz [1], [4], [5].

Viditelné záření nezpůsobuje jenom zrakový vjem, ale také barevný počitek. Každá vlnová délka z rozsahu vlnových délek viditelného záření je buditelem barevného počítka. Vlnové hranice nejsou pro jednotlivé barvy přesně dány, protože jsou závislé jak na zářivém rodu, tak i na spektrální citlivosti oka pozorovatele. Základní rozložení barevných tónů ve spektrální oblasti viditelného záření je uvedeno v Tab. 5-1 [1],[4].

Nejdůležitějším přírodním zdrojem viditelného světla je slunce. Za slunečního svitu je lidské oko schopno rozeznat asi 128 barevných tónů. Díky dlouhodobému vývoji lidského organismu je pro nás sluneční svit nejpřirozenějším a nejpříjemnějším světelným zdrojem. Protože trávíme mnohem více času v uzavřených prostorech, muselo lidstvo vyvinout takzvané umělé zdroje světla [1].

Tab. 2-1 Rozložení barev ve viditelném spektru [4].

Vlnová délka (nm)	Frekvence (THz)	Barva
380 - 430	789 - 697	Fialová
430 - 465	697 - 645	Modrofialová
465 - 490	645 - 612	Modrá
490 - 500	612 - 600	Modrozelená
500 - 560	600 - 535	Zelená
560 - 575	535 - 521	Zelenožlutá
575 - 585	521 - 512	Žlutá
585 - 620	512 - 484	Oranžová
620 - 770	484 - 390	Červená

2.2 Zpracování záření

Systémy, které dokáží určitým sobě vlastním způsobem detekovat záření, nazýváme přijímače záření. Principem jejich funkce je přeměna zářivé energie na jiný druh energie například na bioelektrickou, chemickou, tepelnou a jiné. Podle druhu přeměněné energie můžeme přijímače

dělit na přijímače biologické, tam patří oko nebo listy rostlin a přijímače fyzikální a chemické, mezi ně řadíme luminofory nebo fotoemulze [1].

Jednou z hlavních charakteristik přijímačů je jejich citlivost. Obecně se jedná o podíl získané efektivní energie W_{ef} k zářivé energii W_{dop} . Dá se také vyjádřit jako podíl získaného efektivního výkonu P_{ef} k zářivému toku $\Phi_{e\ dop}$ dopadlému na přijímač. Je dána vztahem

$$s = k_j \frac{W_{ef}}{W_{dop}} = k_j \frac{P_{ef} \cdot t}{\Phi_{e\ dop} \cdot t} = k_j \frac{P_{ef}}{\Phi_{e\ dop}} (-; -, J, J, W, W, s) \quad (2.1)$$

de je

k_j součinitel závislý na volbě jednotek W_{ef} a $P_{ef}(-)$,

t čas po který se sleduje W_{ef} a W_{dop} (s) [1].

U jednotlivých přijímačů se jejich citlivost k záření různých vlnových délek liší, způsobuje to jejich schopnost pohlcovat záření odlišných vlnových délek. Spektrální citlivost popisuje citlivost k monofrekvenčnímu záření, naproti tomu integrační citlivost popisuje složené záření dopadající na přijímač [1].

2.3 Zrakový systém

Zrak je jeden ze základních lidských smyslů. Slouží člověku k získávání informací z okolí. Nositelem informací, které jsme schopni zpracovat za pomoci zraku, jsou světelné a barevné podněty. Zrakový systém neslouží jenom jako přijímač záření, ale dokáže danou informaci i přenést a v nervovém ústrojí člověka zpracovat. Skládá se ze tří částí. Periferní částí jsou oči, ty slouží jako přijímač záření. Spojovací segment je tvořen zrakovými nervy, slouží k přenosu informace do centrální oblasti složené z podkorové a korové částí mozku [1],[4].

2.3.1 Stavba oka

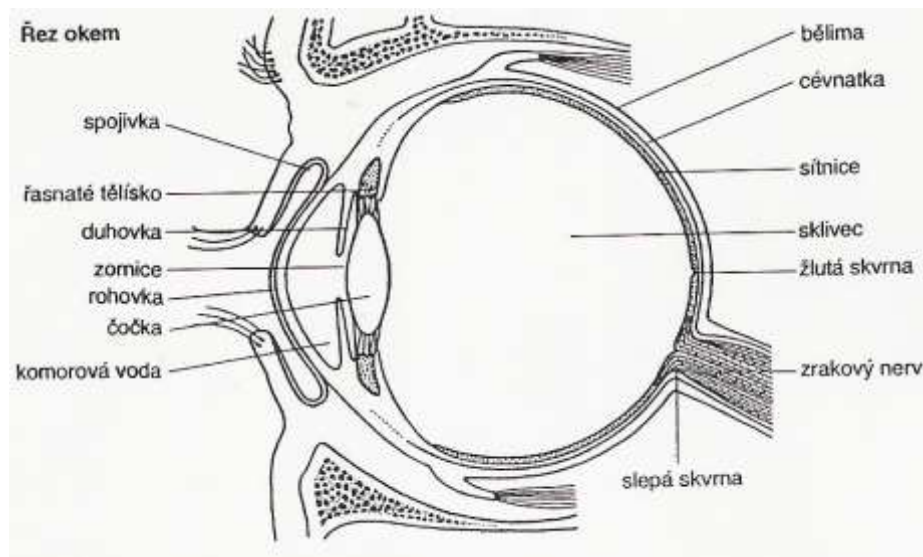
Oko zprostředkovává příjem informace přenášené světlem. Tato informace se upravuje jako nervová podráždění a částečně se i zpracovává. Lidská hlava je vybavena dvěma očima umístěnými symetricky v očníchích. Jednotlivé části oka jsou uvedeny na Obr 5-2 [6],[4].

Kruhový tvar umožňuje snadné a rychlé otáčení v očníchích. Průměr oka u dospělého člověka je přibližně 24 mm. Oční stěnu tvoří tři vrstvy bělma, sítnice a cévnatka, ta slouží pro výživu oka. Oko má dva systémy. Systém optický a systém nervový.

Optickou část tvoří rohovka, slouží k ochraně oka, přední komora s nitrooční kapalinou, duhovka, mechanická, optická clona oka, zornice, vstup světla do oka, čočka průzračné dvojbypuklé tělísko polotuhé pružné konzistence, sklivec, rosolovitá bezbuněčná bezbarvá hmota sloužící jako výplň vnitřního prostoru oka. Optická část vytváří převrácený a zmenšený obraz okolního prostředí.

Nervový systém oka tvoří nervové zásobení a hlavně sítnice, je to průsvitná tenká blána se složitou buněčnou skladbou. Tvoří ji jedenáct vrstev, které obsahují fotoreceptory, gangliové buňky a mnoho dalších nervových buněk. Na sítnici dochází k prvnímu třídění a zpracování

informací, které zachytily fotoreceptory jako časové, jasové, barevné a prostorové rozdíly. Tyto informace jsou zakódovány do podoby schopné přenosu pomocí nervů a vyslány do mozkových center. V oku nalezneme tři druhy fotoreceptorů: čípky, tyčinky a cirkadiální čidla. Čípky slouží především pro denní vidění, kdežto tyčinky jsou využívány pro noční podmínky. Cirkadiální čidla jsou součástí gangliových buněk a slouží k řízení biologických pochodů pravidelně kolísajících v 24 hodinovém cyklu [4].



Obr. 2-2 Řez okem[6]

2.3.2 Činnost oka

Hlavní činností oka je přijmout, zpracovat a předat světelnou informaci. Výzkumy prokázaly, že základní funkční jednotkou sítnice není jeden fotoreceptor, ale vjemové pole. Je to část plochy sítnice, kterou jde podráždit jedno vlákno zrakového nervu. Velikost této plochy se mění v závislosti na jasu světelného procesu a v závislosti na stavu adaptace sítnice. Zrakové vlákno, jiným názvem jedna gangliová buňka, zprostředkovává informace o kontrastech, jasech, barvách i o drobných detailech [4].

2.3.3 Akomodace a adaptace oka

Lidské oko nedokáže naráz zaostřit blízké a vzdálené předměty. Kvůli tomu, aby byl náš pozorovaný objekt vždy ostrý, dochází v přechodu mezi pozorováním jednotlivých vzdáleností k přizpůsobování optického systému oka nazývanému akomodace.

Princip akomodace spočívá ve změně ohniskové vzdálenosti oka. Převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti se označuje jako optická mohutnost a měří se v dioptriích D. Rozdíl převrácených hodnot nejbližší a nejvzdálenější možné akomodace lidského oka se nazývá rozsah akomodace

$$A_o = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \quad (2.2)$$

kde je

A_o rozsah akomodace,

- r_1 vzdálenost blízkého bodu od sítnice (m),
 r_2 vzdálenost blízkého bodu od sítnice (m).

U mladého člověka je akomodace přibližně 10 D, zatímco u starých lidí může být pouze až 2 D. Rozsah akomodace nám ale přímo neposkytuje informaci o kvalitě zraku, protože krátkozraký člověk může mít také 10 D ale pouze v rozsahu 10 cm až 5 cm [1],[4].

Adaptací oka rozumíme jeho schopnost přizpůsobit zrakový vjem různým hladinám osvětlenosti. Oko se dokáže přizpůsobit smršťováním a roztahováním zornice. Avšak hlavním adaptačním mechanismem jsou fotochemické děje [1].

2.3.4 Zraková pohoda

Zraková pohoda vyplývá ze stavu mysli, kdy zrakový systém pracuje za optimálních jemu příjemných podmínek. Člověk by měl při tomto vjemu nejenom dobře vidět, ale také se dobře cítit. Zraková nepohoda neznamena jenom zhoršení viditelnosti a bolest očí, ale má celkový dopad na psychiku a výkonnost člověka [1].

3 FOTOMETRICKÉ VELIČINY

Slouží ke kvalitativnímu a kvantitativnímu určení vyzařované energie ze světelných zdrojů. Jsou základním stavebním kamenem, o který se opírá celá studie světelných zdrojů a osvětlovací technika celkově. Mezi hlavní představitele fotometrických veličin se řadí světelný tok, svítivost, osvětlenost, jas, chromatičnost a všeobecný index podání barev.

3.1 Světelný tok

Světelný tok charakterizuje množství světla vyzářeného světelným zdrojem za jednotku času. Vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový počitek. Světelný tok se značí Φ a jeho jednotkou je lumen (lm) [1].

3.2 Prostorový úhel

Prostorový úhel je důležitá veličina, která se často používá při výpočtech ve světelné technice. Je charakterizován jako část prostoru, který je vymezen kuželovou plochou, jenž na kouli o poloměru r vytvoří plochu A . Vrchol daného kužele leží ve středu koule o poloměru r . Popis dané situace je na Obr. 6-1 [1]. Velikost prostorového úhlu se vypočítá

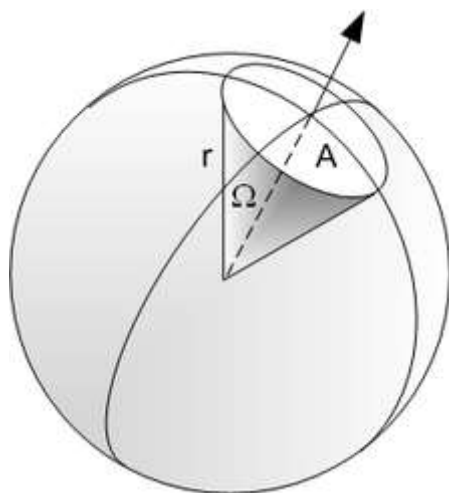
$$\Omega = \frac{A}{r^2} \text{ (sr; m}^2, A\text{)} \quad (3.1)$$

kde je

Ω maximální prostorový úhel ve steradiánech (sr),

A plocha vytvořená kuželem představující daný prostorový úhel (m²),

r poloměr myšlené koule (m) [4].



Obr. 3-1 Prostorový úhel [1]

3.3 Svítivost

Svítivost popisuje, kolik světelného toku vyzaří světelný zdroj v prostorovém úhlu do určitého směru. Střední hodnota svítivosti je dána vztahem

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \text{ (cd; lm, sr)} \quad (3.2)$$

kde je

I svítivost (cd),
 $d\Phi$ světelný tok (lm),
 $d\Omega$ prostorový úhel (sr) [4].

Jednotkou svítivosti je kandela (cd), patří do základních jednotek SI. Přesná definice nám říká, že jedna kandela je rovna svítivosti zdroje, který vyzařuje v určitém směru monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, při hodnotě zářivosti zdroje v tomto směru $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ (wattů na steradián) [1].

Svítivost se určuje pro bodový zdroj, to je zdroj, který má zanedbatelné rozměry vzhledem ke vzdálenosti, ke které se provádí kontrolní měření. Prostorové rozložení svítivosti dostaneme po proměření svítivosti ve všech bodech prostoru okolo zdroje a vynesení hodnot do vektorů. V praxi se využívají pouze řezy těchto prostorových rozložení. Nazývají se křivky svítivosti a udávají se i v katalozích světelných zdrojů [4].

3.4 Osvětlenost

Intenzitě osvětlení se říká osvětlenost. Je definována hodnota světelného toku dopadající na jednotkovou plochu (1 m^2). Jednotkou osvětlenosti je lux (lx). Vypočítá se ze vztahu

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \text{ (lx; lm, m}^2\text{)} \quad (3.3)$$

kde je

E intenzita osvětlenosti (lx),
 $d\Phi$ velikost světelného toku dopadeného na plochu A (lm),
 dA plocha, na kterou dopadá světelné záření (m^2) [4].

Za předpokladu, že zkoumaný světelný zdroj je bodového charakteru, může být osvětlenost určena ze svítivosti. Tato situace je popsána za pomoci čtvercového zákona, ten udává, že intenzita osvětlenosti klesá se čtvercem vzdálenosti. Nastalá situace je popsána vztahem

$$E = \frac{I}{r^2} \cos\beta \text{ (lx; cd, m, } ^\circ\text{)} \quad (3.4)$$

kde je

I svítivost dopadající na plochu (cd)
 r vzdálenost mezi světelným zdrojem a osvětlenou plochou (m),
 β úhel který svírá dopadající paprsek s normálou plochy ($^\circ$).

Velikost úhlu β udává typ osvětlenosti vzhledem k vzájemné poloze mezi světelným zdrojem a osvětlovanou plochou. Rozdělujeme podle něj několik typů osvětlenosti, a to horizontální osvětlenost, vertikální osvětlenost, střední kulová osvětlenost, střední válcová osvětlenost, střední polokulová osvětlenost a střední poloválcová osvětlenost [7],[22].

Horizontální a vertikální osvětlenost slouží k vyhodnocení stavu kvality osvětlení v prostoru pouze pro rovinné plochy, jako je například lavice a tabule. Pro kvalitní určení osvětlenosti prostoru, kde uvažujeme i jiné než rovinné plochy, se využívá střední kulová, válcová, polokulová nebo poloválcová osvětlenost. Tyto metody využívají integraci intenzity osvětlení po dané ploše. Volba vhodné metody závisí na tvaru zkoumaných ploch [22].

3.5 Jas

Jas je světelné technická veličina, na kterou přímo reaguje zrakový systém. Jas je dán prostorovou a plošnou hustotou světelného toku, jeho jednotkou je kandela na metr čtvereční ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$). Je dán vztahem

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{dA_n \cdot d\Omega} = (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lm}, \text{sr}, \text{m}^2) \quad (3.5)$$

kde je

- L_{OP} jas ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$),
- $d\Omega$ prostorový úhel (sr),
- $d\Phi$ světelný tok (lm),
- dA_n plocha, kolmá k ose svazku (m^2) [4].

3.5.1 Kontrast jasu

Je to parametr, podle kterého určujeme viditelnost předmětů. Žádaného parametru dosáhneme porovnáním jasu zkoumaného objektu oproti jasů okolí. Je dán vztahem

$$K = \frac{|L_a - L_b|}{L_b} (-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3.6)$$

kde je

- K kontrast jasu (-),
- L_a jas předmětu ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$),
- L_b jas pozadí ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) [4].

3.6 Světlení

Světlení charakterizuje velikost světelného toku vycházejícího z plochy dA . Jeho jednotkou je lumen na metr čtvereční ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$) a je dán vztahem

$$M = \frac{d\Phi_v}{dA} (\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lm}, \text{m}^2) \quad (3.7)$$

kde je

- M světlení ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$),

$d\Phi$ světelný tok (lm),
 dA plocha, ze které vychází světelný tok (m^2)[3].

3.7 Rovnoměrnost osvětlenosti a jasu

Rovnoměrnost osvětlenosti udává jak rovnoměrně je osvětlená daná plocha. Je určena podílem minimální hodnoty osvětlení a průměrnou hodnotou osvětlení celé plochy. Rovnoměrnost nabývá hodnot od 0 (nejhorší možná hodnota) do 1 (nejlepší možná hodnota). Stejně podmínky platí i pro rovnoměrnost jasu [4].

3.8 Chromatičnost

Chromatičnost charakterizuje barevné vlastnosti světla a je dána spektrálním složením vyzařujícího zdroje. Barvy rozdělujeme na teplé a studené, toto dělení se nazývá teplota chromatičnosti. Udává barvu záření, kterou vydává absolutně černé těleso zahřáté na danou teplotu. Absolutně černým tělesem rozumíme zjednodušený model tělesa, u kterého dochází k pohlcení veškeré energie, která na těleso dopadá. Proto se při nízkých teplotách jeví jako absolutně černé. Obecně můžeme nazvat absolutně černým tělesem každé těleso, jehož plocha, ze které vychází záření, je menší než jeho objem, například slunce. Přehled teplot a k nim náležících barev je na Obr. 6-2 [4]. Jednotkou teploty chromatičnosti je Kelvin (K) a značí se T_c [1],[4],[8].



Obr. 3-2 Teplota chromatičnosti [4]

3.9 Všeobecný index podání barev

Hodnotí kvalitu záření, které vydává světelný zdroj vzhledem k lidskému vnímání světla. Popisuje, jak jsme schopni, při daném osvětlení rozeznat jednotlivé barvy. Značí se R_a a nabývá hodnot od nuly až po sto. Při hodnotě 100 je podání barev v záření světelného zdroje nejpodobnější slunečnímu záření, tudíž je pro lidské vnímání nejpřirozenější. Při hodnotě 0 se jednotlivé barvy od sebe nedají rozlišit [4].

3.10 Měření fotometrických veličin

Měřením fotometrických veličin získáváme skutečný stav funkce světelného zdroje s ohledem na dané provozní parametry. Měření fotometrických veličin dělíme na metodu subjektivní, při té je využito jako detektoru lidského zraku, a metodu objektivní, v níž se využívají jako detektory fyzikální čidla. Měření se dále rozlišuje na měření venkovní, vnitřní a laboratorní. V dané práci se budu zabývat pouze laboratorním, při kterém dochází k potlačení vnějších vlivů.

3.10.1 Měření osvětlenosti

Měření osvětlenosti je jedna z nejčastějších měření fotometrických veličin. Využívá se pro určení ostatních měření fotometrických, protože se jako jedna z mála veličin dá změřit přímou metodou. K měření osvětlenosti se používají luxmetry.

Luxmetr se skládá z přijímače s fotoelektrickým článkem nejčastěji vyrobeným z křemíku. Přijímač je opatřen kosinusovým nástavcem, který potlačuje směrovou chybu, a digitálním nebo analogovým vyhodnocovacím systémem. Fotočlánek pracuje na principu fotoefektu, ten udává, že při působení elektromagnetického záření na látku se uvnitř látky uvolňují elektrony, které v uzavřeném obvodu vytváří elektrický proud a napětí. Napětí je následně pomocí A/D převodníku převedeno na luxy. Jako fotočlánky se používají fotodiody nebo fototranzistory. Luxmetry se dělí do čtyř tříd přesnosti. Nejpresnější pracují s chybou 2% [1],[9].

3.10.2 Měření světelného toku

Pro učení světelného toku se využívají dva způsoby, prvním způsob je graficko-početní metoda z naměřených křivek svítivosti, druhý způsob je měření světelného toku v integrátoru za pomoci normálu světelného toku. Druhý způsob budeme využívat i v praktické části práce, proto si ho přesněji popíšeme [1].

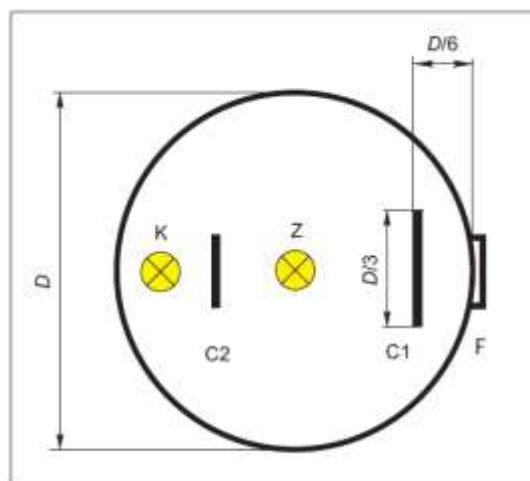
Integrátor pracuje na principu snímání celkové intenzity osvětlenosti vyzařované světelným zdrojem za pomoci fotočlánku. Konstrukční provedení integrátoru může být tvaru krychle, kváдру nebo koule, využitím tohoto tvaru se dosáhne nejpřesnějších výsledků. Vnitřní uspořádání kulového integrátoru je uvedeno na *Obr. 3-3* [1], z něj můžeme pozorovat, že integrátor je dutá koule o průměru D , ve které je umístěn zkoumaný zdroj, korekční zdroj, clony a fotočlánek. Pro snímání celkové intenzity osvětlenosti se využívá mnohonásobných odrazů na vnitřních stěnách integrátoru, proto musí být zajištěná jejich maximální možná odrazivost a barevná neselektivita. Daných požadavků se dosahuje za pomoci vhodných nátěrů (zinková, titanová nebo barytová běloba). Zkoumaný zdroj je umístěn uprostřed kulového integrátoru, tím se dosáhne rovnoměrného rozložení vyzařované intenzity osvětlenosti. Korekční zdroj slouží ke korekci ztrát způsobených stíněním konstrukcí zdroje [1],[7].

Výsledkem měření je intenzita osvětlenosti. Chceme-li zjistit světelný tok, je potřeba provést měření i pro normál, u kterého známe světelný tok, a tyto hodnoty v poměru porovnat. Využívá se zde skutečnosti, že hodnota intenzity osvětlenosti je přímo úměrná světelnému toku zdroje. Výsledný světelný tok zkoumaného zdroje se pak určí ze vztahu

$$\Phi_x = \Phi_N \frac{E_x}{E_N} \frac{E_{kN}}{E_{kx}} (\text{lm}; \text{lm}, -) \quad (3.8)$$

kde je

- Φ_x světelný tok zkoumaného zdroje (lm),
- Φ_N známý světelný tok normálu (lm),
- E_x intenzita osvětlenosti zkoumaného zdroje (lx),
- E_N intenzita osvětlenosti normálu (lx),
- E_{kx} intenzita osvětlenosti při zhasnutém zkoumaném zdroji a rozsvíceném korekčním zdroji (lx),
- E_{kN} intenzita osvětlenosti při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji (lx) [1].



Obr. 3-3 Vnitřní uspořádání integračního kulového fotometru [1]

3.10.3 Měření jasu

Pro měření jasu se nejčastěji využívají takzvané jasoměry. Jsou to přístroje, které fungují na principu výpočtu jasu z prostorového úhlu, který je určen tubusem přístroje a osvětleností, ta je změřena za pomoci přijímače, fotočlánku umístěného za tubusem. Využívá se vztahu

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \text{ (cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lx, sr)} \quad (3.9)$$

kde je

L střední hodnota jasu pro daný prostorový úhel ($\text{cd} \cdot \text{m}^2$),

E_N normálová osvětlenost (lx),

Ω prostorový úhel (sr) [1].

3.10.3.1 Program LumiDISP

Program LumiDISP je vědecký program sloužící pro jasovou analýzu z digitální fotografie. Jako jasoměr využívá fotoaparát se speciálními korekcemi, pro přesné sejmutí požadovaných digitálních dat. Program dokáže měřit jas, rovnoměrnost jasu, rozložení jasu po celém snímaném objektu. Dále dokáže vytvářet jasové řezy, které jsou důležité pro zjištění průběhu jasu po světelném zdroji [25].

3.10.4 Měření čar svítivosti

Čary svítivosti světelných zdrojů jsou důležitým podkladem pro návrhy osvětlovacích soustav. Pro měření čar svítivosti se nejčastěji využívají goniofotometry.

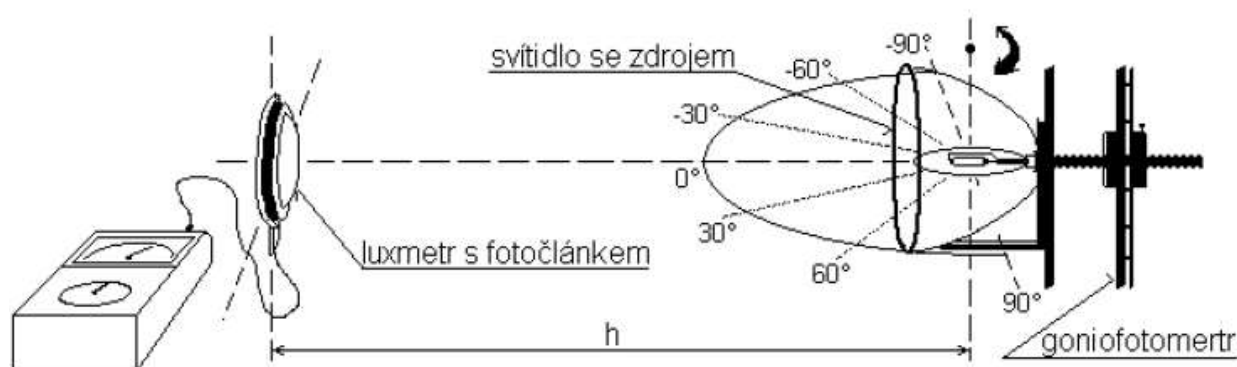
3.10.4.1 Goniofotometr

Goniofotometr dokáže měřit svítivost světelného zdroje v různých fotometrických rovinách a pod různými úhly. Může mít tři typy uspořádání:

1. Otočný zdroj a pevný fotometr.
2. Pevný zdroj a otočný fotometr.
3. Pevný zdroj i fotometr s otáčivou zrcadlovou soustavou [1].

Ukázka goniofotometru s otočným zdrojem a pevným fotometrem je na *Obr. 3-4* [7]. Fotočlánek, jak je patrné z obrázku, je umístěn v ose svítidla, a svítidlo se otáčí horizontálně kolem osy. To může mít za následek, že výsledky měření pro světelné zdroje, které mají předepsanou svou pracovní polohu, můžou být zkreslené. Z daného důvodu bude tento typ goniofotometru prioritní pro následné zjišťování vlivu polohy světelného zdroje na fotometrické parametry [7].

Druhé dva typy goniofotometrů pracují na společném principu a to je rotace snímacího systému kolem upevněného zdroje s tím rozdílem, že u goniofotometru s otočným fotometrem se otáčí přímo fotočlánek, kdežto u goniofotometru s otáčivou zrcadlovou soustavou se otáčí nakloněná zrcadla, která odráží záření do fotočlátku. Tyto typy jsou vhodnější pro rozměrově menší světelné zdroje a je u nich zajištěna polohová stabilita zdroje [1].



Obr. 3-4 Goniofotometr s otočným zdrojem a pevným fotometrem [7]

4 SVĚTELNÉ ZDROJE

Za světelné zdroje považujeme tělesa, která dokáží ve finální části vyzářit viditelné světlo. Světelné zdroje dělíme na přírodní nebo na umělé. Mezi přírodní řadíme například slunce, blesk nebo měsíc, kdežto umělé zdroje jsou ty, co vyrobil člověk. Umělé světelné zdroje dělíme na teplotní, výbojové a luminiscenční, podrobné dělení umělých světelných zdrojů je v *Obr. 4-1* [1]. V práci se dále nebudu zabývat přírodními světelnými zdroji, protože pro danou práci nemá jejich podrobnější charakteristika žádný význam [1].

4.1 Základní parametry světelných zdrojů

Jsou to ukazatele kvality daného světelného zdroje. Řadíme mezi ně světelný tok, měrný výkon, náhradní teplotu chromatičnosti, index podání barev, životnost, rozměry, druh použité patice, dovolenou provozní polohu světelného zdroje, napětí, provozní teplotu zdroje atd. [4].

4.1.1 Měrný výkon světelných zdrojů

Měrný výkon světelných zdrojů nám udává, kolik elektrické energie přeměnil světelný zdroj na světlo. Popisuje, jak velkou hodnotu světelného toku lze získat z jednoho wattu. Je dán vztahem

$$\eta_p = \frac{\Phi}{P} \text{ (lm} \cdot \text{W}^{-1}; \text{lm, W)} \quad (4.1)$$

kde je

η_p měrný světelný výkon ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$),
 $d\Phi$ světelný tok (lm),
 P elektrický příkon (W) [4].

4.1.2 Náhradní teplota chromatičnosti

Je to teplota, která odpovídá ekvivalentnímu teplotnímu zdroji s podobným spektrálním složením, jaký má daný výbojový zdroj. Hovoříme o ní u výbojových zdrojů, u teplotních zdrojů nám udává barvu přímo teplota chromatičnosti. U světelných zdrojů se rozlišují tři hlavní kategorie barvy světla- teple bílá, bílá a denní. Pro teplotu chromatičnosti menší než 3300 K hovoříme o teple bílé, pro T_{cp} větší než 5000 K o denní a pro interval ležící mezi těmito dvěma hodnotami hovoříme o bílé [4].

4.1.3 Životnost světelného zdroje

Je to doba, po kterou nám světelný zdroj dokáže dodávat světelný tok, až po určitou mezní hodnotu. Dělíme ji na průměrnou, z pozorovaných zdrojů nám za tuto dobu bude svítit přesně 50 %, zbytek zdrojů bude nefunkční, a užitečnou, je definována jako časový úsek od 100 % světelného toku až do doby, kdy bude světelný tok na úrovni 80 % [4].

Elektrické světelné zdroje	-teplotní	-žárovky	-obyčejné	-vakuové
				-plněné plynem
			-halogenové	
	-výbojové	-nízkotlaké výbojky	-využívající kladný sloupec s elektrodami	-zářivky
				-germicidní výbojky
				-kompaktní zářivky
				-spektrální výbojky
				-nízkotlaké sodíkové výbojky
				-svítící trubice
			bez elektrod	-indukční výbojky
		-využívající katodové světlo	-doutnavky	
		-vysokotlaké výbojky	-s výbojem stabilizovaným elektrodami	-xenonové
				-rtuťové
				-halogenidové
			-s výbojem stabilizovaným stěnou výbojové trubice s elektrodami	-xenonové
				-rtuťové
				-halogenidové
				-sodíkové
		bez elektrod	-sírné	
			-halogenidové	
	-elektroluminiscenční			-světelné diody (LED)
-elektroluminiscenční panely				

Obr. 4-1 Rozdělení umělých světelných elektrických zdrojů [1]

4.2 Teplotní světelné zdroje

U tepelných světelných zdrojů je vydávána světelná energie pouze doprovodným efektem tepelného jevu, to má za následek špatnou účinnost světelných zdrojů pracujících na tomto principu. Princip funkce teplotních zdrojů spočívá v elektroinkandescenci, ta značí emisi viditelného záření díky průchodu elektrického proudu pevnou látkou. Důležitou vlastností teplotních světelných zdrojů je, že mají spojité spektrum vyzařované energie. S touto vlastností se u jiných světelných zdrojů nesetkáváme. Hlavním představitelem teplotních světelných zdrojů jsou žárovky, které jsou uvedeny na obr. 7-2 [4].



Obr. 4-2 Teplotní světelné zdroje a) halogenová žárovka OSRAM CLASIC ECO SUPERSTAR A [10], b) obyčejná 100 W žárovka [11]

4.2.1 Obyčejné žárovky

Pracují na principu průchodu elektrického proudu wolframovým vláknem. Elektrický proud rozzhaví vlákno na vysokou teplotu a to emituje mimo jiné i světelnou energii. Vlákno má průměr od 10 μm až do 120 μm , je svinuté do jednoduché nebo dvojité šroubovice. Vlákno je připevněno na přívodech elektrické energie a připevněno podpěrnými molybdenovými háčky umístěnými na takzvané nožce, ta obsahuje čočky, tyčinky a jiné skleněné polotovary. Celý tento komplex je zataven do baňky, ta je vyrobena ze sodno-vápenatého skla. Přívod elektrické energie je rozdělen na tři části vnitřní (vyrobenou z niklu), prostřední (železoniklové jádro s měděným pláštěm) a vnější (vyrobenou ze slitiny niklu a mědi, slouží zároveň jako pojistka. Vnější přívody zajišťují napájení z objímky svítidla prostřednictvím patice, ty dělíme na závitové E27 a bajonetové B22d. Aby nedocházelo k přetavení vlákna, je prostor uvnitř baňky zbaven nežádoucích plynů (kyslík a vodík). Žárovka může být pouze vakuovaná nebo plněna plynem, ten zvyšuje životnost vlákna.

Hlavní výhody obyčejných žárovek jsou malé rozměry, jednoduchá konstrukce, malá hmotnost, spojité spektrum vyzařovaného světla, index podání barev 100, okamžitý start, přímé napájení ze sítě, jednoduchá manipulace a instalace, zavedená hromadná výroba a snadná likvidace.

Za největší nevýhody obyčejných žárovek považujeme velice malý měrný výkon, krátkou životnost a vysoký pokles světelného toku. Hlavně z energetického hlediska obyčejné žárovky nemají budoucnost a probíhá jejich doprodej [1].

4.2.2 Vliv teploty a polohy na parametry obyčejných žárovek

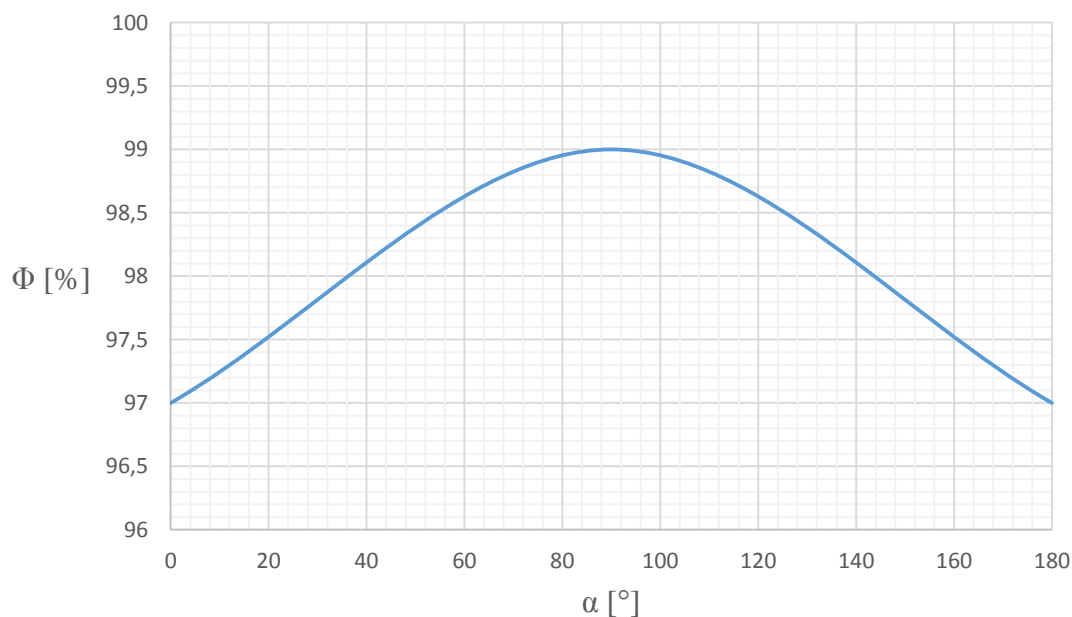
Vliv okolní teploty na světelný tok žárovky je minimální z důvodu vysoké teploty, která vzniká v žárovce, ta je mnohonásobně větší než může dosáhnout okolí, v kterém se žárovka nachází. Teplota wolframového vlákna v žárovce se pohybuje okolo 2500 $^{\circ}\text{C}$, tato teplota rozechřívá stěny baňky až na 230 $^{\circ}\text{C}$, proto musí být celá žárovka vytvořena s teplotně odolných materiálů, ty jsou popsány výše [1].

Žárovku můžeme vzhledem k závislosti polohy na světelném toku použít v jakékoliv poloze bez většího poklesu světelného toku, ten se pohybuje přibližně kolem dvou procent, jak lze pozorovat z Obr. 4-4. Výrazně se však s polohou mění rozložení teploty na povrchu banky. Teplo stoupá směrem vzhůru, to je způsobeno tím, že hustota látky s klesající teplotou stoupá. Proto bude

nejvíce teplotně zatížena ta část baňky, která je nahoře. Rozložení teploty na povrchu rozsvícené žárovky je uvedeno na Obr. 4-3 [12],[13].



Obr. 4-3 Rozložení teploty na povrchu rozsvícené obyčejné žárovky v závislosti na její poloze [12]



Obr. 4-4 Předpokládaná závislost světelného toku žárovky na poloze [13]

4.2.3 Halogenové žárovky

Halogenové žárovky pracují na podobném principu jako obyčejné žárovky s tím rozdílem, že se do jejich náplně přidává halogen. Ten potlačuje usazování wolframu na baňce, zvyšuje stabilitu světelného toku a prodlužuje užitečný život záření. S novou příměsí však nastaly konstrukční a materiálové změny oproti obyčejným žárovkám. Byly vyloučeny všechny materiály, u kterých by mohlo dojít k chemické reakci s halogeny. Dále pak skleněná baňka musela být vyrobena z teplotně

a mechanicky odolnějšího materiálu. Dosáhlo se tak zvýšení tlaku v baňce, to má příznivý vliv na odpařování wolframu. Halogenové žárovky mohou být v provedení jednotiskovém nebo dvoustiskovém. Jednotiskové jsou konstrukčním provedením podobné obyčejným žárovkám, oproti tomu dvoustiskové mají lineární konstrukci [1].

Výhody použití halogenových žárovek oproti obyčejným žárovkám jsou delší životnost, baňka nečerná a má stabilní světelný tok během celé životnosti, vyšší měrný výkon až $30 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, velká odolnost vůči teplotním změnám, vyšší teplota chromatičnosti až 3100 K a malý průměr baňky. Porovnání parametrů obyčejné žárovky a halogenové žárovky je uvedeno v Tab. 4-1 [4].

Tab. 4-1 Porovnání parametrů tepelných světelných zdrojů [1],[14]

Název	P [W]	$\eta_p [\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}]$	$R_a [-]$	$T_{cp} [\text{K}]$	Životnost [h]
Obyčejné žárovky	3 - 200	3 - 20	95 - 100	2,8 – 3,0	1000
Halogenové žárovky	5 - 2000	5 - 30	95 - 100	2,9 – 3,1	4000

4.2.4 Vliv teploty a polohy na parametry halogenových žárovek

Vliv okolní teploty na halogenové žárovky je podobný jako na obyčejné žárovky. Teplota vláken halogenových žárovek dosahuje hodnoty až 3000 K, tím je opět zajištěna stabilita světelného toku vzhledem k teplotě. Jedinou podmínkou je, že teplota patice nesmí přesáhnout hodnotu 350 °C, jinak by mohlo dojít k porušení molybdenové izolace a následnému znehodnocení celé výplně [1].

Poloha jednotiskových halogenových zářivek je libovolná. Pokles toku je přibližně 5 % a to, když je žárovka ve vodorovné poloze [13]. U dvoustiskových může docházet ve svislé poloze k nerovnoměrnému rozložení halogenů v trubici a z toho plynoucím nerovnoměrnému průběhu cyklu. Tento jev nastává za předpokladu, že molární hmotnost halogenidu je rozdílná oproti molární hmotnosti interního plynu. Působením teplotní difúze dojde k omezení výskytu halogenu na spodní studené části, kdežto v horní teplejší části bude pouze interní plyn. Proto mají některé tyto typy předepsanou vodorovnou polohu svícení. Pro krátké halogenové žárovky s příkonem nad 500 W je doporučena vodorovná poloha svícení s tolerancí 15° [15].

4.3 Výbojové světelné zdroje

Výbojové světelné zdroje využívají ke své funkci výboj, který vzniká průchodem elektrického proudu prostředím, které obsahuje směs vhodných par (páry rtuti, sodíku, halogenidů) a plynů. Výboj vzniká díky schopnosti změny nevodivého plynu bez volných nosičů elektrického proudu na plyn s volnými nosiči proudu, tato změna se nazývá ionizace plynu. Ionizaci rozumíme rozpad neutrálních atomů za přispění vnější energie. Při rozpadu se uvolňují kladné ionty a elektrony, to má za následek vznik vodivého prostředí. V tomto prostředí se elektrický proud projevuje jako elektrický výboj [14].

Výbojové světelné zdroje rozlišujeme podle typu výboje (obloukový bezelektroodový, doutnavý, impulsní), dále podle místa vzniku záření a nejdůležitější dělení je podle velikosti tlaku pracovní náplně. Tlak pracovní náplně ovlivňuje parametry světelného zdroje, jako je životnost,

konstrukce, provozní parametry a oblast využití. Podle tlaku rozdělujeme výbojové světelné zdroje na nízkotlaké a vysokotlaké [1].

Některé výbojové světelné zdroje potřebují pro správnou funkci předřadné přístroje, které nazýváme obecně předřadníky. Ty slouží k úpravě síťových parametrů napětí na požadované parametry, při kterých je zajištěna správná funkce výbojových světelných zdrojů. Obecně mají za úkol snížit napětí na výboji, zmenšit proud dodávaný zdroji, kompenzovat jalový proud, omezovat elektromagnetické rušení a vytvořit potřebné zápalné napětí pro vzplanutí oblouku, které může dosahovat u některých typů výbojových zdrojů až 5 kV. Předřadníky dělíme na elektromagnetické (využívané nejčastěji pro vysokotlaké výbojové zdroje) a elektronické (využívané nejčastěji pro nízkotlaké výbojové zdroje) [16].

4.3.1 Nízkotlaké výbojové zdroje

K hlavním představitelům nízkotlakých výbojových zdrojů patří zářivky, kompaktní zářivky, indukční výbojky a nízkotlaké sodíkové výbojky. Tyto typy světelných zdrojů pracují s tlakem okolo 1 Pa. Záření, které vyzařují, spadá prakticky celé do ultrafialové oblasti spektra, proto vždy obsahují transformační prvek, který převede jejich vlastní záření do viditelné oblasti spektra. Porovnání parametrů uvedených nízkotlakých výbojových světelných zdrojů je uvedeno v Tab. 4-2 [1].

Tab. 4-2 Porovnání parametrů nízkotlakých výbojových zdrojů [1],[14]

Název	P [W]	η_p [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]	R_a [-]	T_{cp} [kK]	Životnost [h]
Zářivky	4 - 200	20 - 104	49 - 98	2,7 - 17	20000
Kompaktní zářivky	15 - 200	14 - 87	59 - 90	2,7 - 6,5	20000
Sodíkové výbojky	18 - 180	100 - 200	0	1,8	20000
Indukční výbojky	40 - 400	64 - 100	80 - 90	2,7 - 6,5	100000



Obr. 4-5 Nízkotlaké výbojové světelné zdroje a) lineární zářivka PHILIPS [17], b) kompaktní zářivka PHILIPS [17], c) sodíková výbojka Master SOX-E T50 [17], d) indukční výbojka OSRAM [18]

4.3.1.1 Zářivky

Zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, jejichž výboj vyzařuje ultrafialové záření, které vybuzuje přes luminofor požadované viditelné záření. Typem luminoforu se dají ovlivnit parametry vyzařovaného záření. Nejčastější provedení zářivek je lineární, ale mohou být i tvaru U nebo kruhové. Lineární zářivka je tvořena trubicí z měkkého sodno-vápenatého skla, na kterém je nanesená vrstva luminoforu. Oblouk je vybuzen za pomoci wolframových elektrod umístěných na koncích trubice. Elektrody jsou namontovány na nožkách, ty se skládají z talířků a čerpací trubičky. Černáním konců se předchází za pomoci kovové clony umístěné kolem elektrody na neutrálním přívodu. Zářivky jsou zakončeny patičkami typu G13 nebo G5 se dvěma kolíky ty slouží k přívodu elektrické energie a zajišťují kontakt s předřadným a startovacím obvodem [1].

Jednou z nejdůležitějších a také nejproblematictějších částí zářivek, je plynná část. Tu tvoří rtuť a interní plyny. Množství rtuti v zářivkách se pohybuje okolo 3 mg, z důvodu její toxicity a následnou problematickou výrobou a likvidací musí výrobci používat pouze minimální nezbytné množství. Interní plyn se přidává do zářivek z důvodu snížení zápalného napětí výboje a zabránění rychlému rozprašování emisní hmoty, nejčastěji se využívá argon nebo směs argonu s kryptonem. Výboj vzniká a probíhá v nasycených parách rtuti při 0,8 Pa a v interních přídavných plynech při 0,2 až 0,4 kPa [1],[4].

K výhodám zářivek patří vysoká hodnota měrného výkonu až $104 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, přijatelný index podání barev až 80 (u speciálních typů až 98), rozmanitý sortiment typů zářivek vzhledem k příkonu od 4 W do 200 W a vzhledem k teplotě chromatičnosti od 2 700 K až po 17 000 K a dlouhá životnost okolo 20 000 h. Mezi nedostatky zářivek se řadí vliv počtu zapnutí na životnost, obsah toxické rtuti a nutnost zapojení přes předřadné a startovací obvody [1].

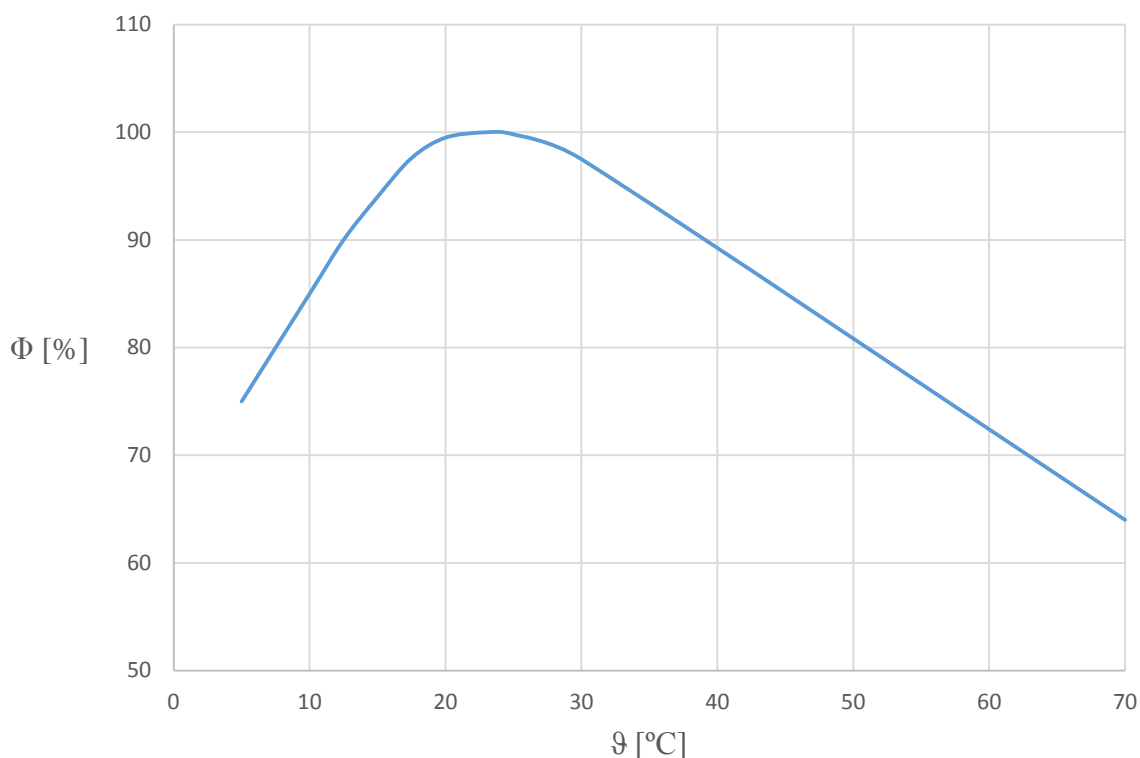
4.3.1.2 Vliv teploty a polohy na parametry lineárních zářivek

Vliv okolní teploty na zářivku je zobrazený na *Obr. 4-6* [1]. Z něj je patrné, že zářivka je konstruována na provoz při teplotě okolo 25 °C, při této teplotě dosahuje stěna trubice teploty 45 °C. Tento stav je ideální pro maximální vyzařování světelného toku přes luminofor a zajištění spolehlivosti zažehnutí výboje i bez využití interního plynu. Pro srovnání je zde uvedena závislost na *Obr. 4-7* [26], převzatá z katalogu Philips [17],[1].

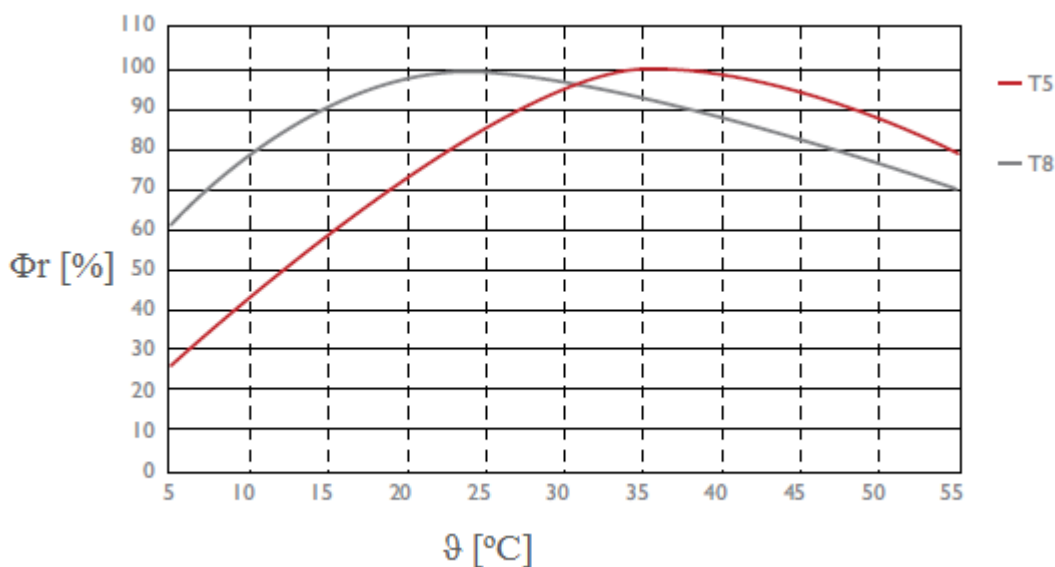
Při vyšších teplotách se zvyšuje tlak v parách rtuti a dochází k snížení množství vyzařovaného světelného toku a změně barvy vyzařovaného záření. Nastalé jevy jsou způsobeny tím, že vyzařované záření se vlivem zvýšeného tlaku částečně přesune ze spektra UV záření do viditelné části spektra a tím není plně využit princip luminiscence. K snížení vlivu zvýšené okolní teploty se přidává do rtuťové směsi interní plyn, ten zvětší rozsah teplotních hodnot, ve kterých je zářivka schopná udržet přípustnou hodnotu vyzařovaného světelného toku. Další možností je vytvořit na zářivce umělý chladný bod, ten zajistí vhodný tlak nasycených par rtuti a tím udrží vyzařované záření na požadované hodnotě. Umělý chladný bod se dá vytvořit přesunutím jedné z elektrod blíže ke středu zářivky a tím dojde k jeho vzniku za touto elektrodou [1],[15].

Při snížené teplotě okolí se zmenšuje tlak v plynu a dojde ke změně vyzařované energie, která není schopna vyzářit přes luminofor požadované množství světelné energie a dochází k poklesu

světelného toku. Dále má snížená okolní teplota za následek zhoršení zapalovacích podmínek zářivky. Jako řešení vzniklých problémů se využívá snížení tlaku v interním plynu [15].



Obr. 4-6 Závislost světelného toku zářivky na okolní teplotě [1]



Obr. 4-7 Závislost světelného toku zářivek různých typů T na okolní teplotě uvedená v katalogu PHILIPS [17]

U lineárních zářivek je poloha svícení libovolná. V pracovní svislé poloze může dojít k určitým nerovnoměrnostem vyzařovaného světelného toku. Horní část zářivky bude vlivem stoupající teploty více zahřívána než spodní a dochází k následnému poklesu světelného toku v této části zářivky zhruba o 5 %. Dále v určité poloze může dojít k odklonění oblouku směrem ke stěně, to

vede přehřívání luminoforu a následnému poklesu světelného toku, tento jev platí pro všechny výbojové zdroje [15],[17],[19].

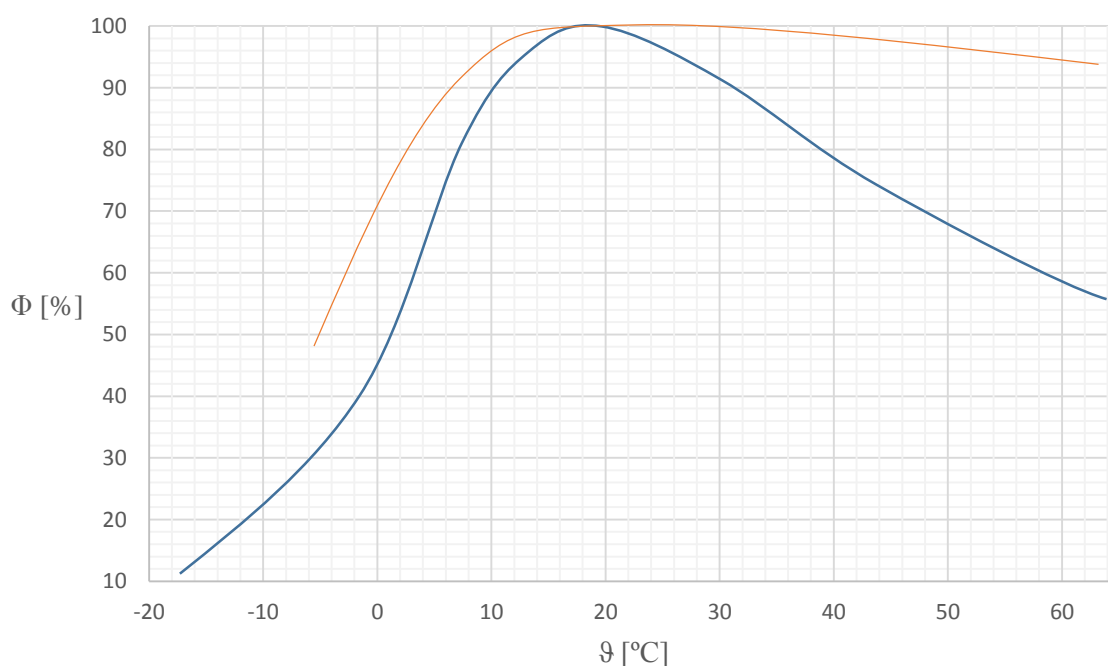
4.3.1.3 Kompaktní zářivky

Kompaktní zářivka pracuje na stejném principu jako lineární zářivka s tou obměnou, že tvar její trubice je zakroucen do tvaru, který rozměrově odpovídá žárovkám. Dosahují nejen rozměrové podobnosti, ale snaží se také dosáhnout kvality vyzařovaného světla. Kvůli pokroucenému tvaru a následnému vlastnímu stínění vyzařované energie, nedosahují tak velkého měrného výkonu jako lineární zářivky, ale i tak je mnohonásobně větší než u žárovek, pohybuje se od 50 až po 80 lm W⁻¹ [4].

Hlavní výhody kompaktních zářivek jsou podobnost užitečných parametrů s žárovkou, dobré podání barev hodnota R_a přesahuje 80, všechny typy odstínů bílé barvy, doba životnosti až 20 000 h, možnost použití stmívačů a velmi malý obsah rtuti. Nevýhody jsou stejné jako u lineárních zářivek [1].

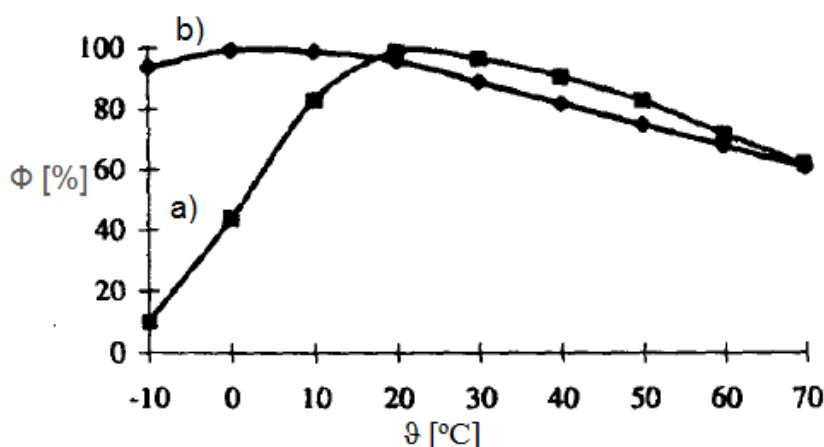
4.3.1.4 Vliv teploty a polohy na parametry kompaktních zářivek

Vliv okolní teploty na kompaktní zářivky je obdobný jako vliv okolní teploty na lineární zářivku, jelikož pracují na stejném funkčním principu. Na Obr. 4-8 [1] je uvedena závislost, na které můžeme pozorovat rozdílný vliv okolní teploty na vyzařovaný světelný tok mezi kompaktní zářivkou s rtuťovou náplní a kompaktní zářivkou naplněnou amalgámem india. Kompaktní zářivka naplněná amalgámem india má stabilní světelný tok i při vyšších teplotách. Pokles světelného toku může být také způsoben blízkostním jevem, ten způsobuje přehřívání částí zářivky vlastní konstrukcí [1],[19].

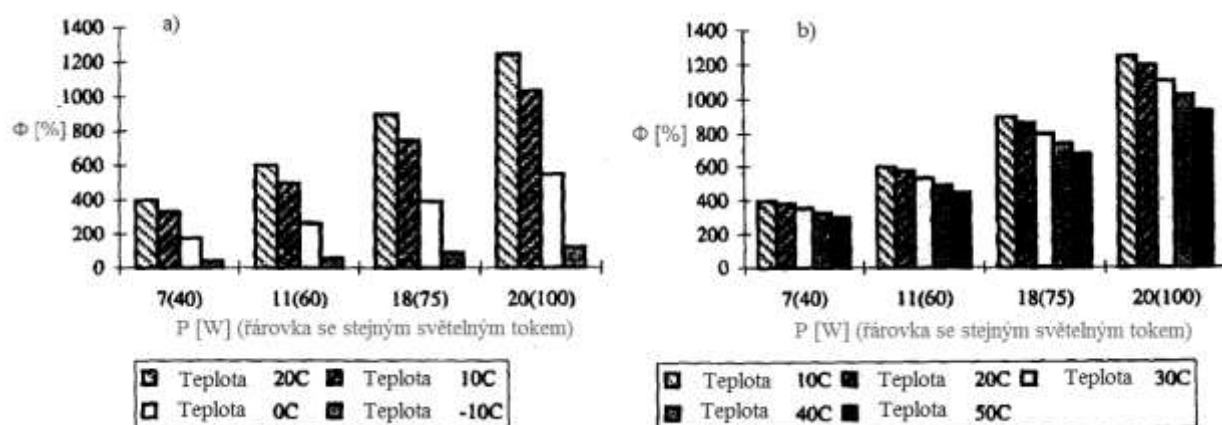


Obr. 4-8 Závislost světelného toku kompaktní zářivky na okolní teplotě (modrá křivka - standardní provedení, oranžová křivka - provedení s amalgámem india) [1]

U kompaktních zářivek se katalogově udává libovolná poloha svícení. Z Obr. 4-9 [20] lze pozorovat průběhy závislostí vyzařovaných světelných toků zářivky na teplotě s rozdílnou polohou. Je možné pozorovat, že pro okolní provozní teplotu 25 °C dochází k poklesu vyzařovaného světelného toku zhruba o 10 % a to pro zářivku umístěnou v lineární poloze s paticí dole. Tento jev je způsoben přehřátím horní části kompaktní zářivky a následnou změnou tlaku. V obrácené poloze je přebytečné teplo předáno do patice, tudíž tento jev nenastává, alespoň ne v tak velkém rozsahu. Porovnání velikosti světelného toku v závislosti na příkonu kompaktní zářivky je pro různé teploty uveden na Obr. 4-10 [21],[23].



Obr. 4-9 Závislost světelného toku kompaktní zářivky na teplotě a) svislá poloha patice nahore, b) svislá poloha patice dole (upravený [20])



Obr. 4-10 Závislost světelného toku kompaktní zářivky na příkonu a teplotě a) svislá poloha patice nahore, b) svislá poloha patice dole (upravený [20])

4.3.1.5 Nízkotlaké sodíkové výbojky

Nízkotlaké sodíkové výbojky vyzařují viditelné záření ve žluté části spektra v rozsahu vlnových délek mezi 589 až 589,6 nm. Pracují při provozním tlaku 0,1 až 1,5 Pa (jiné zdroje uvádí 2 Pa). Dosahují skvělého měrného výkonu až 200 lm·W⁻¹, ale jejich index podání barev je nejhorší možný ze známých světelných zdrojů. Příkon současných nízkotlakých sodíkových výbojek dosahuje maximálně 180 W. [1],[14].

Konstrukční provedení nízkotlakých sodíkových výbojek je problematické z důvodu velké chemické aktivity čistého sodíku, proto je hořák vyroben ze speciálně upraveného vápenatého skla pokrytého tenkou vrstvou boritého skla. Hořák je uložen ve vnější baňce s odrazovou vrstvou a je zakroucen do tvaru U, aby byla prodloužena proudová dráha výboje. Konce hořáku jsou zakončeny elektrodami z wolframového drátu. Náplň hořáku tvoří čistý sodík a interní plyn (nejčastěji neon s přídavkem argonu), který se přidává z důvodu snížení napětí zapalování. K přívodu elektrické energie slouží patice typu BY22 s keramickým izolačním kamenem [1],[14].

Hlavní výhody sodíkových výbojek jsou vysoký měrný výkon, dlouhá životnost až 20 000, široký pás teplotní nezávislosti, spolehlivost zápalu i při nízkých teplotách a neobsahuje zdraví škodlivé látky jako zářivky. Mezi nevýhody se řadí špatné podání barev, speciální předřadné obvody a nárůst příkonu v průběhu života. Nejsou vhodné pro osvětlování prostorů kde je požadovaný kvalitní zrakový počítetek [1]

4.3.1.6 . Vliv teploty a polohy na parametry nízkotlakých sodíkových výbojek

Sodíkové výbojky skvěle fungují i při nízkých teplotách, spolehlivý start až do -20°C . Zvýšená okolní teplota zvyšuje tlak v parách sodíku, a to má za následek zvýšení napětí na výboji, které vede k poškození elektrod [1].

Poloha svícení u výbojek o příkonu do 55 W je ve vertikální poloze s paticí umístěnou nahoře. Při změně polohy by se sodík mohl dostat k těsnění mezi sklem a elektrodami, to by mělo za následek snížení účinnosti a zkracování délky života zdroje. Pro výbojky o příkonu 90 W je předepsaná horizontální poloha s tolerancí 20° [1].

4.3.1.7 Indukční výbojky

Princip funkce indukčních výbojek je podobný jako u nízkotlakých rtuťových výbojek s tím rozdílem, že k zažehnutí a hoření výboje se nepoužívají elektrody, ale využívají vysokofrekvenčního elektromagnetického pole vytvořeného za pomoci cívek. Výhodou oproti zářivkám je, že obsahují méně konstrukčních částí, které mohou chemicky reagovat s vnitřní výplní a díky nepřítomnosti elektrod také delší životnost. Jako předřadný systém indukčních výbojek slouží výhradně elektronické předřadníky. Vliv okolní teploty a polohy je u indukčních výbojek stejný jako u zářivek [4],[14].

Hlavní výhody indukčních výbojek jsou okamžitý start a znovuzápal, dobrá stabilita světelného toku, velmi dlouhá životnost až 100 000 h, velmi dobré podání barev $R_a > 80$ a dobrý měrný výkon až $100 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Za nedostatky se považuje omezený sortiment nabízených typů, vysoká cena a špatná stmívatelnost [1].

4.3.2 Vysokotlaké výbojové zdroje

Vysokotlaké výbojové zdroje pracují s tlakem, který je mnohonásobně větší než pracovní tlak nízkotlakých výbojových zdrojů, dosahuje hodnot v řádu kPa. Díky zvýšenému tlaku rtuťové výplně dochází ke změně vyzařovaného spektra záření, které se přesunuje za části i do viditelného spektra záření. To teoreticky umožňuje využít tyto zdroje k přímému osvětlování bez úprav vydávaného záření, ale z hlediska kvality záření postrádá vydávané záření červenou složku spektra, a proto není vhodné využívat tyto zdroje bez dalších úprav záření. Možnosti úpravy záření na požadovanou

spektrální kvalitu jsou využiti luminoforu (vysokotlaké rtuťové výbojky), přidáním vhodných prvků do výplně (halogenidové výbojky), náhrada rtuti jiným plynem (vysokotlaké sodíkové výbojky) a zkombinování vydávaného záření se zářením žárovek (směšové výbojky). Porovnání parametrů uvedených vysokotlakých výbojových světelných zdrojů je uvedeno v *Tab 7-3* a na *Obr. 4-11* [1].

Tab. 4-3 Porovnání parametrů vysokotlakých výbojových světelných zdrojů [1],[14]

Název	P [W]	η_p [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]	R_a [-]	T_{cp} [kK]	Životnost [h]
Rtuťové výbojky	50 - 3500	36 - 80	35 - 65	2,9 - 4,3	16000
Směšové výbojky	100 - 500	11 - 26	60 - 72	3,3 - 3,8	16000
Halogenidové výbojky	35 - 18000	25 - 130	65 - 90	2,8 - 10	30000
Sodíkové výbojky	35 - 1500	35 - 150	20 - 58	1,8 - 2,55	50000



Obr. 4-11 Vysokotlaké výbojové zdroje a) rtuťová výbojka PHILIPS [17], b) halogenidová výbojka PHILIPS [27], c) sodíková výbojka PHILIPS [27]

4.3.2.1 Vysokotlaké rtuťové výbojky

Světelný počítetek stejně jako u zářivek způsobuje výboj, který vzniká v parách rtuti při prvotním tlaku 0,1 MPa. Pro dosažení požadované kvality a intenzity viditelného záření je použito luminofor, jak už jsem uvedl v předchozím odstavci. Dosahují měrného výkonu mezi 50 - 80 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$, při indexu podání barev $R_a = 60$. Náhradní teplota chromatičnosti vyzařovaného záření je v rozsahu od 2900 K až po 4300 K [4].

V důsledku zvětšeného pracovního tlaku se konstrukce vysokotlakých rtuťových výbojek výrazně liší oproti konstrukčnímu provedení zářivek. Jsou vytvořeny z výrazně odolnějších

materiálů. Hořák výbojky je vytvořen z křemičitého skla a obsahuje tři wolframové elektrody, dvě hlavní a jednu pomocnou. Elektrody jsou ošetřeny proti zvýšeným teplotním a tlakovým podmínkám nanesenou emisní vrstvou a k vakuovému utěsnění je použita molybdenová folie. Výplň hořáku tvoří rtuť a argon, ten usnadňuje zapálení výboje. Výboj vzniká nejprve mezi pomocnou a hlavní elektrodou po přivedení potřebného napětí. Náplň hořáku začne ionizovat a dojde k zapálení oblouku mezi hlavními elektrodami. Hořák je obklopen vnější baňkou, která stabilizuje výbojku jak teplotně tak i elektricky, a slouží k nanesení vrstvy luminoforu. Vnější baňka je zhotovena z borito-křemičitého nebo sodno-vápenatého skla. Pro přívod elektrické energie je zaopatřena paticí E27 nebo E40 [1].

Výhody vysokotlakých rtuťových výbojek jsou dlouhá doba životnosti 12 000 až 16 000 h, polohová nezávislost, dobrá stabilita světelného toku, spolehlivost při nízkých teplotách a nízká cena. K nevýhodám se řadí malá účinnost, špatné podání barev, špatná stmívatelnost a dlouhá doba chladnutí pro opětovnou možnost rozsvícení hned po vypnutí [1].

4.3.2.2 Vliv teploty a polohy na parametry vysokotlakých rtuťových výbojek

Díky vysokému tlaku v hořáku a vysoké provozní teplotě je vysokotlaká rtuťová výbojka schopna pracovat v širokém spektru okolních teplot bez větších výkyvů vyzařovaného světelného toku. Spolehlivý provoz až do $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

Předepsaná provozní poloha pro tento typ výbojek je libovolná. V závislosti na poloze stejně jako u nízkotlakých rtuťových výbojek může docházet k odklonění oblouku ke stěnám hořáku a následnému malému poklesu světelného toku [17].

4.3.2.3 Směšové výbojky

Jejich konstrukce i princip činnosti jsou založeny na vysokotlakých rtuťových výbojkách. Rozdílné jsou v tom, že k doplnění chybějícího červeného spektra záření se nevyužívá pouze luminofor, ale k elektrodám je do série připojeno žárovkové vlákno. Tímto řešením se dosáhne lepšího podání barev až $R_a = 72$ a zvýšení náhradní teploty chromatičnosti na úroveň hodnot mezi 3300 K až po 3800 K na úkor snížení měrného výkonu [1].

Výhody směšové výbojky oproti vysokotlaké sodíkové výbojce jsou lepší teplota chromatičnosti a lepší index podání barev, nevýhoda je malý měrný výkon. Směšové výbojky se využívají jako náhrada za klasické žárovky s velkým výkonem [1].

4.3.2.4 Vliv teploty a polohy na parametry směšových výbojek

Směšová výbojka je kombinace rtuťové vysokotlaké výbojky a žárovky, tudíž pro ni budou platit stejné polohové i teplotní podmínky jako pro tyto dva světelné zdroje.

4.3.2.5 Halogenidové výbojky

Fungují na podobném principu jako vysokotlaké rtuťové výbojky a tím rozdílem, že do plynné náplně jsou přidány halogenidy, sodík a prvky vzácných zemin. Správnou kombinací přídavných látek lze dosáhnout různých spektrálních vlastností vyzařovaného záření. Díky příměsím dosahuje skvělého indexu podání barev $R_a > 98$, vysokého měrného výkonu až $130\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ a širokého

intervalu náhradní teploty chromatičnosti. Z tohoto důvodu jsou to v současné době nejvyužívanější vysokotlaké výbojové zdroje [14].

Konstrukční provedení je rovněž jako princip funkce podobný rtuťovým zářivkám. Hlavní konstrukční změnou oproti rtuťovým výbojkám je nahrazení křemenného hořáku korundovým hořákem, ten je vhodnější pro nižší příkony. Dále pak přítomnost halogenidů neumožňuje použití emisní hmoty využívané u rtuťových výbojek. Pro přívod elektrické energie využívají buď závitovou patici, bajonetovou patici nebo patici s kontaktními kolíky [1].

Hlavní výhodou halogenidových výbojek je různorodost využití díky možnosti ovlivnění parametrů vyzařovaného záření, nevýhody jsou vysoká cena a obsah jedovaté rtuti [1].

4.3.2.6 Vliv teploty a polohy na parametry halogenidových výbojek

Vliv okolní teploty je na halogenidovou výbojku minimální. Je možné ji využít jak pro venkovní tak vnitřní osvětlení [1].

Při svislé poloze svícení může dojít ve spodní části ke kondenzaci jodidu, to má za následek změnu parametrů vyzařovaného záření. Tento jev se odstraňuje zvětšením průměru hořáku v poměru $d_h : l_h = 1 : 4$. Při vodorovné poloze svícení dochází k průhybu vyzařovaného oblouku směrem k horní stěně hořáku. Následkem tohoto jevu dochází k prodloužení proudovodné cesty, zvětšení odporu a následnému poklesu vyzařovaného světelného toku zhruba o 15 %. Moderní halogenidové výbojky nemají předepsanou polohu svícení, ale většinou se doporučuje svislá poloha kvůli vhodnému rozložení výboje [15].

4.3.2.7 Vysokotlaké sodíkové výbojky

Vysokotlaké sodíkové výbojky využívají stejně jako nízkotlaké sodíkové výbojky výboj v parách sodíku. Dosahují nižších hodnot měrného výkonu $150 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, ale i tak jsou považovány za jedny z nejúčinnějších světelných zdrojů. Díky zvýšenému tlaku se rozšiřuje spektrální podání vyzařovaného záření, to má za následek zlepšení indexu podání barev, který může dosáhnout hodnot až $R_a = 85$.

Konstrukční provedení je z důvodu vysokého tlaku složitější. Hořák je vyroben z polykrystalického korundu, který je mechanicky odolnější než hlinito-borité sklo, které se nachází v konstrukci nízkotlakých sodíkových výbojek. Na koncích hořáku jsou připájeny skleněnou pájkou proudové průchodky pro přívod elektrické energie. Tento spoj musí odolávat sodíkovým i rtuťovým parám a vysokým teplotám, proto je jedním z hlavních ukazatelů životnosti zdroje. Náplň hořáku tvoří sodík s interním plynem přidávaným pro stejné účely jako u ostatních výbojových zdrojů. Hořák je umístěn na držáku uprostřed skleněné baňky, která je zakončena paticí různého druhu [1].

Mezi přednosti vysokotlakých sodíkových výbojek se řadí vysoký měrný výkon, dlouhá životnost až 30 000 hodin, spolehlivý provoz a kompaktní rozměry. Nevýhodou je nízký index podání barev [1].

4.3.2.8 Vliv teploty a polohy na parametry vysokotlakých sodíkových výbojek

Stejně jako v případě vysokotlakých rtuťových výbojek můžeme díky vysoké provozní teplotě považovat sodíkovou vysokotlakou výbojku za spolehlivou v širokém rozsahu okolních teplot. Podmínkou je, že teplota u připájeného spoje v hořáku nesmí překročit určitou mezní teplotu, jinak by došlo k znehodnocení zdroje [1].

Sodíkové výbojky se považují za polohově nezávislé zdroje, určitý pokles světelného toku se dá předpokládat stejně jako u jiných výbojových zdrojů ve vertikální poloze, vzhledem k nerovnoměrnosti rozložení teploty na hořáku [3].

4.4 Elektroluminiscenční světelné zdroje

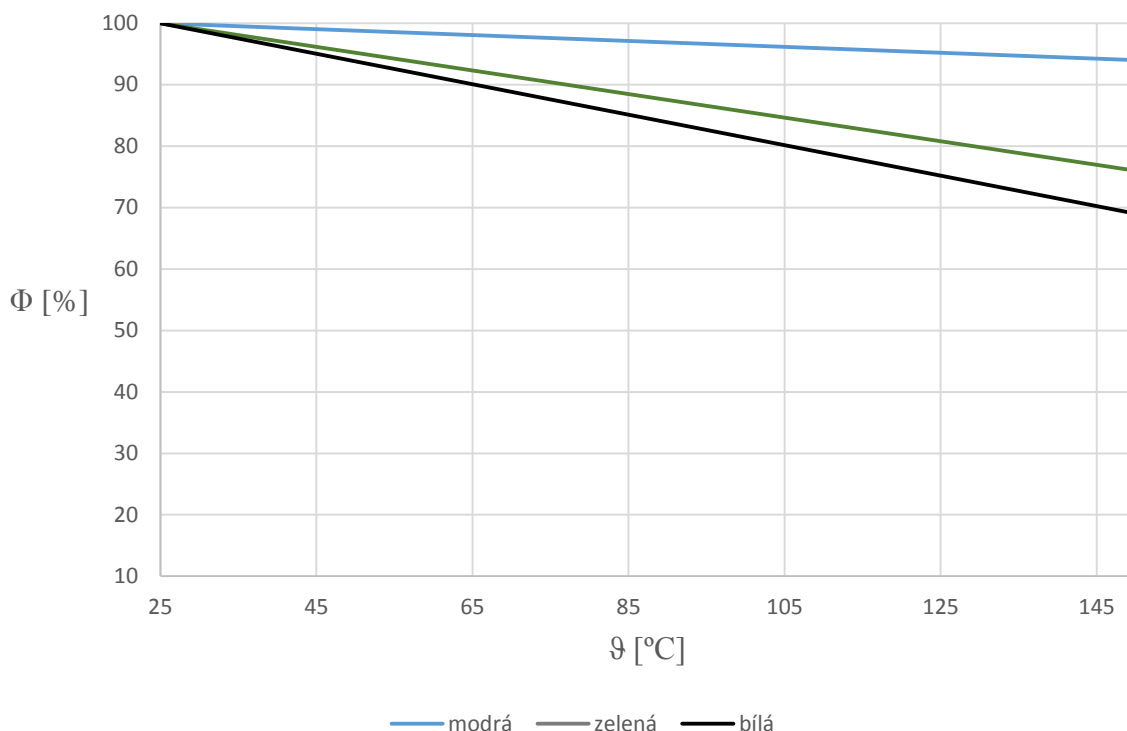
Elektroluminiscenční světelné zdroje pro účely osvětlování využívají dva principy funkce. První a nejdůležitější je vybuzení viditelného záření průchodem elektrického proudu přes PN přechod polovodičové součástky. Do této skupiny se řadí světelné diody LED. Druhý princip využívá vybuzení světelného záření z luminoforu za pomoci elektromagnetického pole. Na tomto principu pracují elektroluminiscenční panely [1].

4.4.1 Světelné diody LED

Světelné diody patří mezi nejúčinnější světelné zdroje, postupně přebírají prioritní místo ve většině osvětlovacích oblastech. Pro účely osvětlování se využívají bílé diody nebo diody, které vyzařují UV záření, to je následně převedeno přes luminofor do viditelné oblasti spektra. Diody se vyrábí z polovodičových materiálů. Podle prvku obsažených v polovodiči se liší světelné vlastnosti diod. Výhody využití LED diod jsou vysoký měrný výkon, dlouhá doba svícení, nízká spotřeba a libovolná poloha svícení [1].

4.4.2 Vliv teploty a polohy na světelné diody

Správná funkce PN přechodu závisí na teplotě. Mezní teplota PN přechodu se pohybuje od 80 do 100 °C. Při překročení tohoto rozmezí dochází k výraznému poklesu světelného toku a snížení doby provozního života svícení diody. Pokles světelného toku v závislosti na velikosti teploty PN přechodu je uveden na *Obr. 4-12* [1]. Elektroluminiscenční světelné zdroje mají libovolnou polohu svícení [1].



Obr. 4-12 Závislost vyzařovaného světelného toku diod různých vyzařovaných spekter na teplotě PN přechodu [1]

4.5 Určení nejvhodnějších světelných zdrojů pro zkoumání vlivu pracovní polohy na změnu fotometrických parametrů

S ohledem na předchozí teoretický rozbor je pravděpodobné předpokládat nejvýraznější změny fotometrických parametrů u světelných zdrojů pracujících na principu výboje. Tento předpoklad vychází z toho, že vzniklý elektrický oblouk může měnit tvar v důsledku změny pracovní polohy. Změna tvaru oblouku způsobí změnu vyzařované energie. Z nízkotlakých výbojových zdrojů jsem zvolil lineární zářivku T5. U ní by se měla projevit nejen změna tvaru oblouku výboje, ale také změna rozložení teploty po trubici, protože pracuje při nízkých provozních teplotách. Pro vysokotlaké výbojové zdroje jsem zvolil halogenidovou výbojku z důvodu šířky jejího hořáku, ta zajistí vhodný prostor pro změnu tvaru oblouku výboje. Uvedeným dvěma typům světelných zdrojů se v praktické části věnuji nejdůkladněji.

Pro komplexnost celé praktické části jsem dále zvolil další zástupce, u kterých může nastat změna fotometrických parametrů v závislosti na poloze, a to kompaktní zářivku a obyčejnou žárovku. Pro tyto typy uvažuji jako hlavní problém únik tepla přes patici zdroje. Pro celkové zhodnocení vlivu pracovní polohy na fotometrické parametry budu využívat nejen naměřená data v praktické části, ale také data, která byla proměřena již dříve pro práce s podobným druhem zaměření.

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část se zabývá proměřením vlivu změny pracovní polohy na fotometrické parametry světelných zdrojů, které byly vybrány v teoretické části práce. Změna pracovní polohy je myšlena vždy ke středu svítidla a pouze ve svislé rovině vzhledem k zemi. Změna pracovní polohy ve vodorovné rovině by neměla na fotometrické parametry žádný vliv. Měření probíhalo ve světelné laboratoři v budově Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.

5.1 Zkoumání vlivu změny pracovní polohy na lineární zářivku T5

Měření má za úkol zjistit vliv pracovní polohy na fotometrické parametry lineární zářivky T5. Předpoklad je, že se změnou polohy se bude měnit světelný tok, jas a rozložení teploty na povrchu světelného zdroje.

Zkoumaný objekt

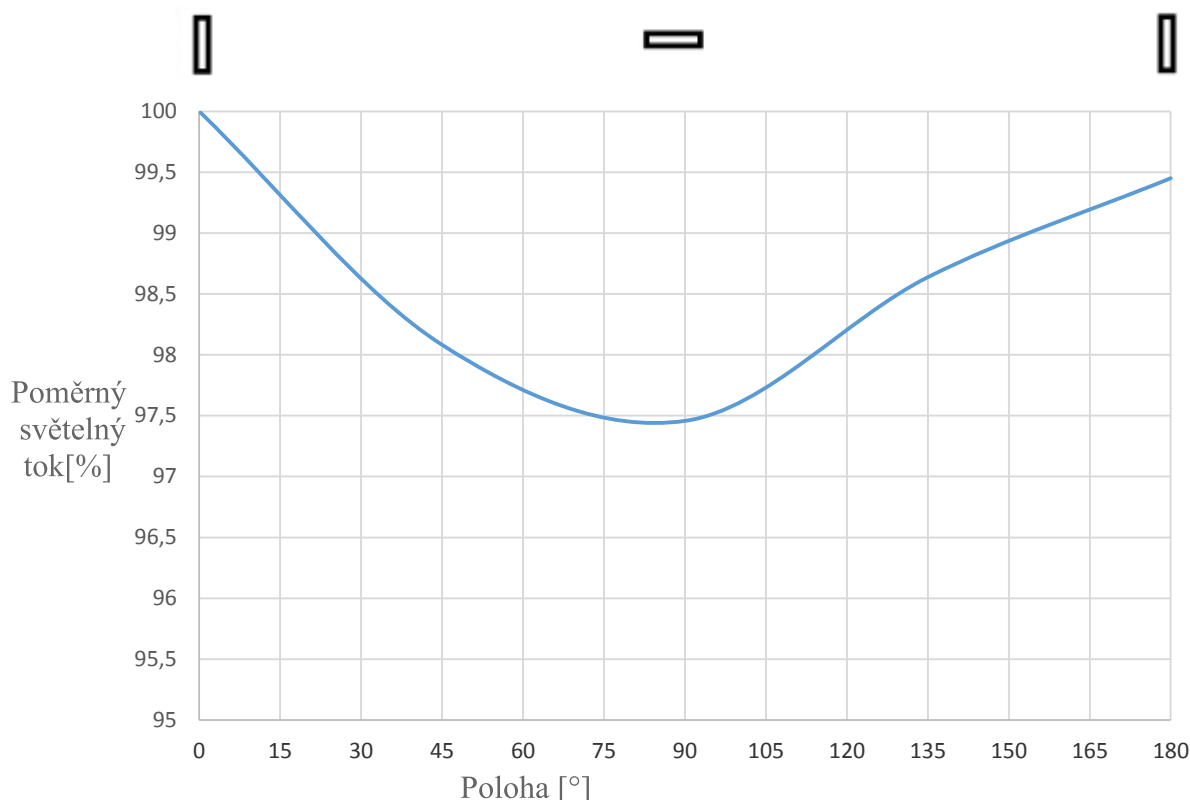
Jedná se o lineární zářivku OSRAM T5 FH 28W/840 HE. Má studeně bílou barvu vyzařovaného světla ($T_c = 4000K$). Vyzařovaný světelný tok je 2600 lm. Délka životnosti světelného zdroje dosahuje až 24000 hodin svícení. Řadí se do nízkotlakých výbojových světelných zdrojů. Využití k osvětlování interiérů, například kanceláří a škol.[18]

5.1.1 Měření světelného toku zářivky v kulovém integrátoru

Měření v kulovém integrátoru slouží k zjištění velikosti vyzařovaného světelného toku. Zářivka byla uchycena na přívodním kabelu. Za jeho pomoci se měnil úhel natočení zářivky po 45° vzhledem ke středu světelného zdroje. První poloha, tedy 0° , značí umístění zářivky ve svislé poloze s tím, že chladný bod je umístěn nahoře. Před prvním měřením se nechala zářivka hodinu rozsvícená z důvodu ustálení světelného toku a ustálení teploty v trubici. Po změně pracovní polohy se opět nechaly ustálit parametry před měřením, přibližně 45 minut. Zářivka byla napájena přes elektronický předřadník OSRAM.

5.1.1.1 Výstupy měření

Z Obr. 5-2 je patrné, že lineární zářivka má pokles světelného toku okolo dvou a půl procenta, a to ve vodorovné poloze. Maximální světelný tok nastává při vertikální poloze zářivky v případě, kdy chladný bod je v horní části zářivky. Pro opačnou situaci je pokles nepatrný přibližně půl procenta.



Obr. 5-1 Závislost poměrného světelného toku zářivky na její pracovní poloze

5.1.2 Měření jasu a snímání změny rozložení teploty za pomoci goniofotometru

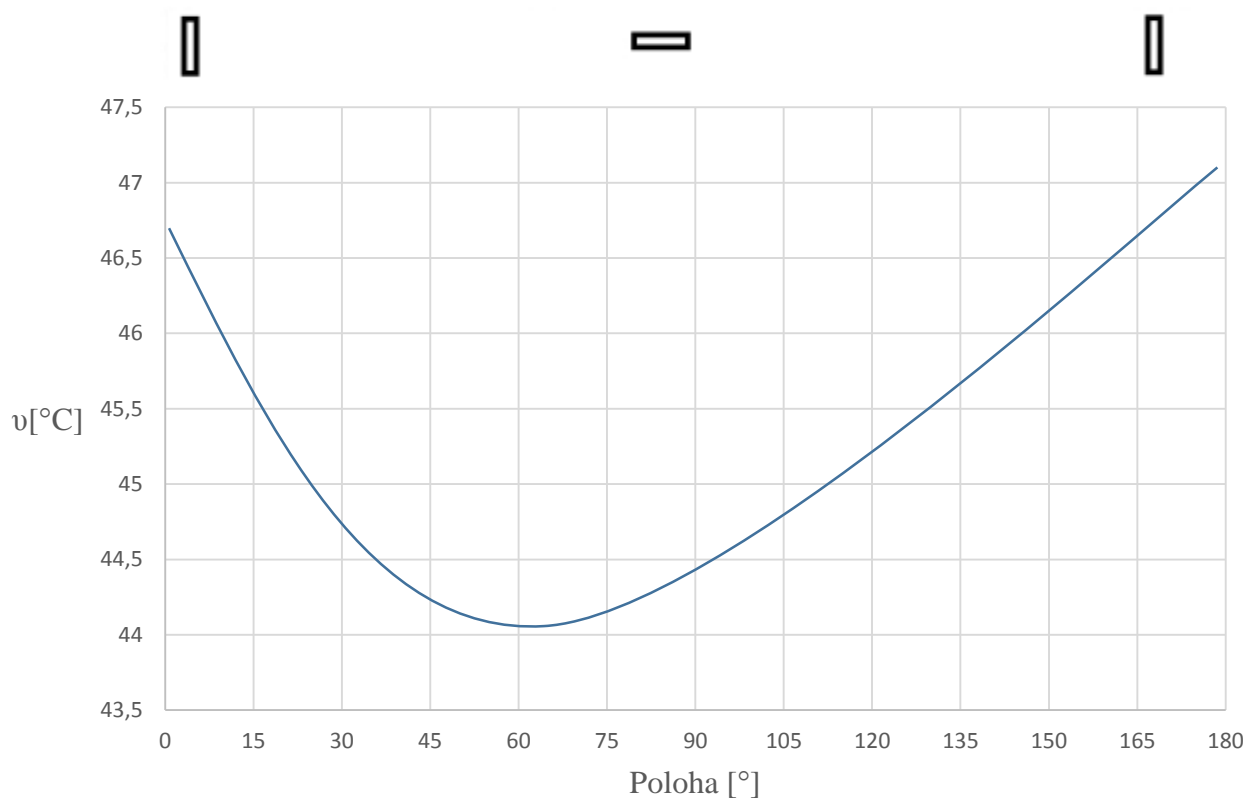
Změna polohy byla zajištěna za pomoci goniofotometru, posun byl vždy v ose y, a to po 15°, vzhledem k předešlé pozici. První poloha tedy 0° značí umístění zářivky ve svislé poloze s tím, že chladný bod je umístěn nahoře. K snímání jasu sloužil digitální fotoaparát Nikon D90 se speciálními filtry a program LumiDISP, který dokáže využít základní data z fotografie a z nich vytvořit jasovou analýzu. Pro snímání změny rozložení teploty byla využita termokamera. Před prvním měřením se nechala zářivka hodinu rozehrát stejně jako při měření světelného toku. Dále pak po změně pracovní polohy, byl ponechán časový interval 15 minut před měřením k ustálení vyzařovaných parametrů. Rozložení pracoviště a umístění jednotlivých přístrojů je uvedeno na Obr 5-2.



Obr. 5-2 Rozmístění přístrojů pro snímání jasů a změny rozložení teploty lineární zářivky (1.termokamera, 2.fotoaparát Nikon D90, 3. zkoumaný objekt, 4. goniofotometr)

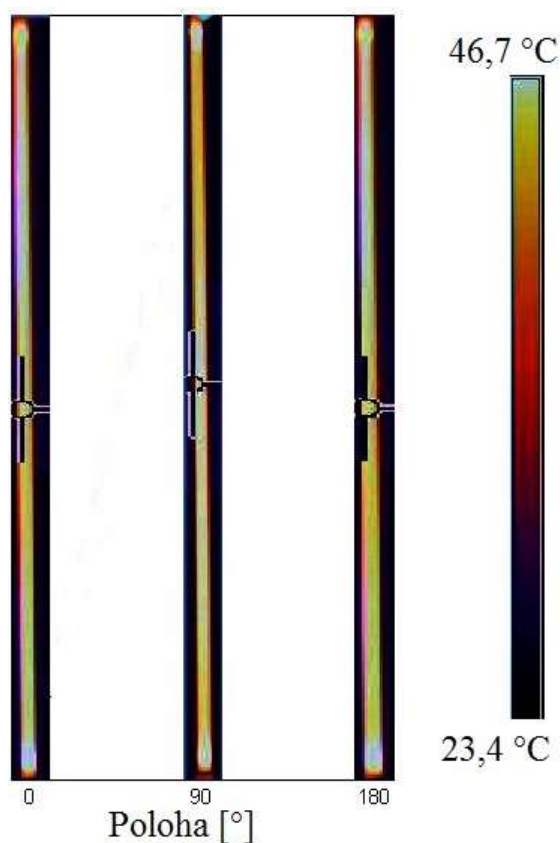
5.1.2.1 Výstupy měření termokamerou

Z Obr. 5-3 je viditelný pokles teploty povrchu lineární zářivky. To je způsobeno tím, že ve vertikální poloze má zářivka největší možnou plochu pro přestup tepla. Pokles teploty způsobí, že chladný bod nepracuje při svých optimálních podmínkách (45-50 °C) a dochází k snížení tlaku v parách rtuti. Tyto jevy zapříčiní pokles světelného toku zářivky.



Obr. 5-3 Závislost provozní teploty trubice na poloze lineární zářivky

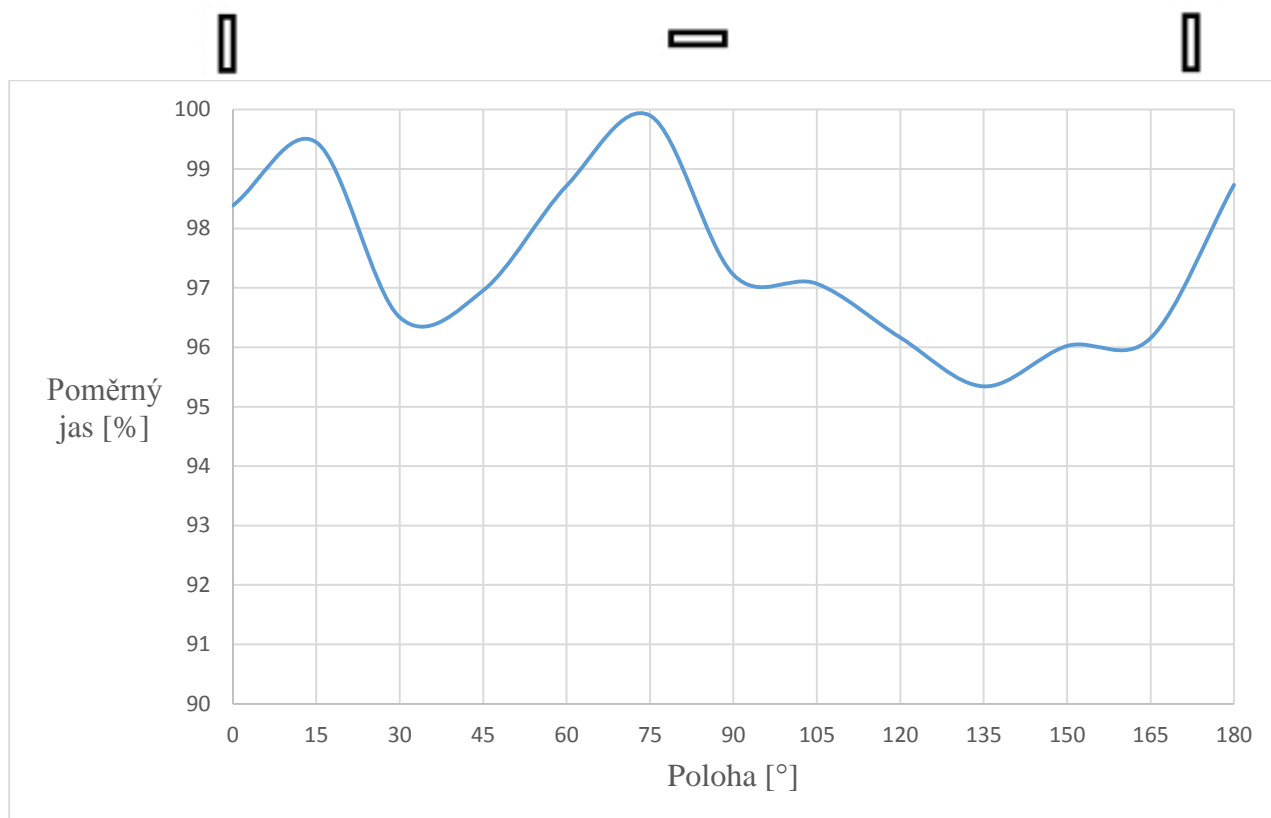
Obr. 5-4 zobrazuje rozložení teploty po povrchu lineární zářivky v základních pracovních polohách (pracovní polohy běžné pro průmyslové využití). Ve vertikálních polohách je patrná nerovnoměrnost rozložení teploty po trubici, kde horní část je více zahřívána než spodní. Horizontální pracovní poloha zajišťuje nejlepší rozložení teploty, proto je nejvhodnější pro provoz zářivky.



Obr. 5-4 Rozložení teploty na povrchu trubice lineární zářivky v základních pracovních polohách

5.1.2.2 Výstupy jasové analýzy

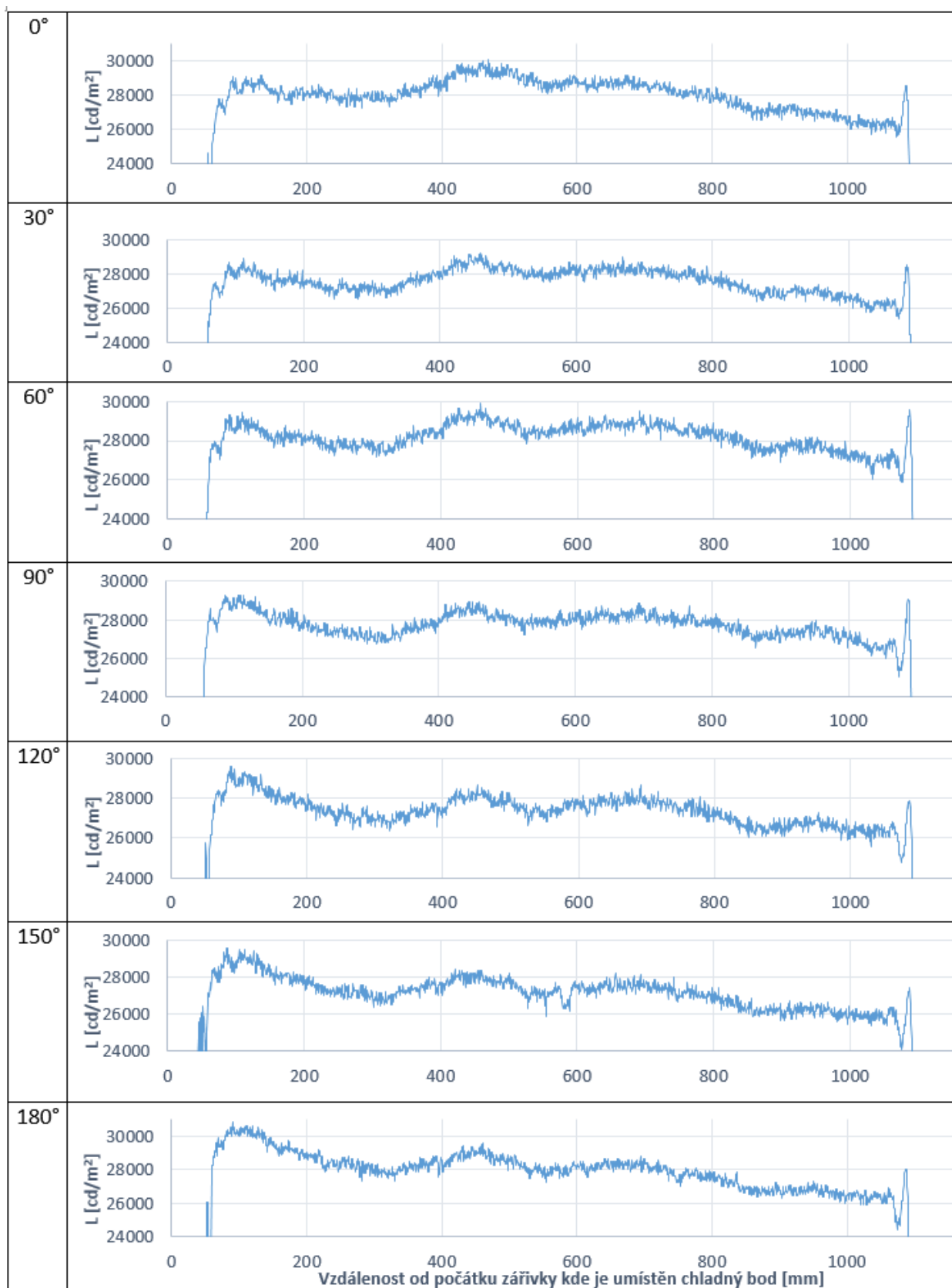
Celkový vyzařovaný jas zářivky v závislosti na pracovní poloze by měl odpovídat průběhu světelného toku na pracovní poloze *Obr.5-2*. Na *Obr. 5-5* je uveden průběh jasů v řezu zářivky v závislosti na poloze, je z něj patrné, že v zářivce dochází k změně hodnot jasů. Průběh jasů v řezu lineární zářivky neodpovídá průběhu světelného toku, z toho lze usoudit, že v trubici dochází v závislosti na poloze k změně rozložení výboje v trubici.



Obr. 5-5 Závislost poměrného jasů v řezu lineární zářivky v závislosti na poloze

Rozložení jasů v řezu lineární zářivky v závislosti na poloze je zobrazeno v *Tab. 5-1*. Největší nerovnoměrnost rozložení jasů je patrná pro vertikální polohu s chladným bodem v dolní části (180°). V horní části trubice dochází k přehřívání par, to způsobí zvýšení tlaku a následný pokles jasů. Pro opačný případ, kdy je chladný bod v horní části, tento jev nenastává, protože chladný bod zajistí snížení tlaku v parách rtuti. Rozložení vyzařovaného jasů je pro lineární zářivku v základních pracovních polohách rovnoměrné, jak ukazuje *Příloha A-3*.

Tab. 5-1 Rozložení jasu v řezu lineární zářivky v závislosti na její pracovní poloze



5.1.3 Celkové zhodnocení naměřených charakteristik pro zkoumanou lineární zářivku

Vyzařovaný světelný tok klesl o tři procenta při horizontální pracovní poloze zářivky. To neodpovídá teoretickému předpokladu, kdy by maximální světelný tok měl být právě v této poloze. K poklesu by mělo dojít ve vertikální poloze, z důvodu přehřátí par rtuti následkem stoupajícího tepla. Tento rozdílný výsledek je nejspíše zapříčiněn poklesem teploty v horizontální poloze pod ideální provozní teplotu zářivky. Vyzařovaný jas zářivky má také pokles o tři procenta. Ze vztahů (3.2), (3.3) a (3.7) vyplývá, že svítivost, osvětlenost a světlení jsou přímo úměrné světelnému toku. Z toho můžeme odvodit, že průběhy pro svítivost, osvětlenost a světlení v závislosti na pracovní poloze budou shodné s průběhem světelného toku a pokles bude také kolem tří procent. Výrazná změna naměřených parametrů by nastala při umístění lineární zářivky do svítidla. V takovém případě by nedocházelo k tak výraznému ochlazení světelného zdroje. Naměřené parametry by pak odpovídaly teoretickému předpokladu, kdy je maximální vyzařovaný světelný tok ve vodorovné pracovní poloze. Z výstupů měření lze pozorovat, že vliv pracovní polohy na lineární zářivku T5 je malý, to potvrzuje data udávaná výrobcem o libovolné poloze svícení.

5.2 Zkoumání vlivu změny pracovní polohy na halogenidovou výbojku

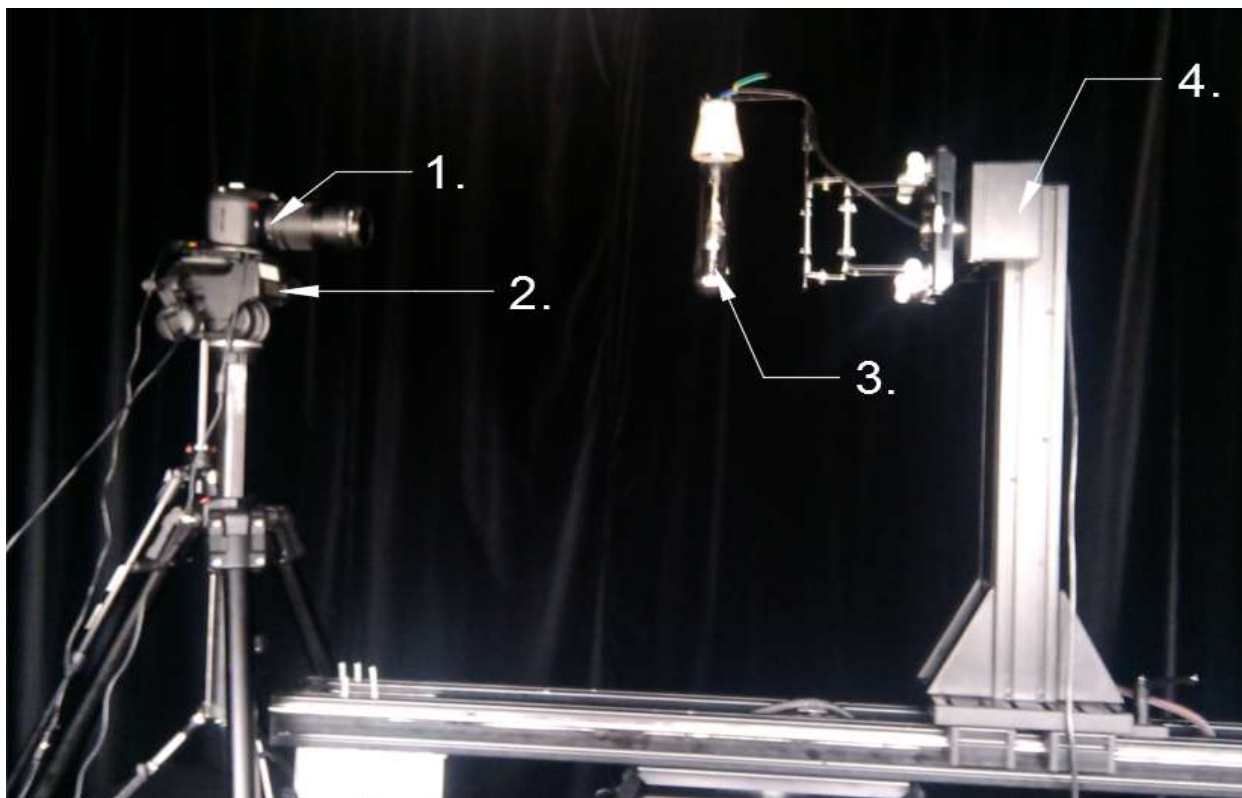
Měření má za úkol zjistit změnu fotometrických parametrů halogenidové výbojky v závislosti na změně pracovní polohy. Předpoklad je, že se bude měnit celkový vyzařovaný světelný tok, jas a spektrum záření.

Zkoumaný objekt

Jedná se o halogenidovou výbojku Philips HPI-T 400W. Má modrobílé spektrum vyzařované energie ($T_c = 4300K$). Její světelný tok je 35000 lm. Délka životnosti světelného zdroje je až 24000 hodin svícení. Řadí se do vysokotlakých výbojových světelných zdrojů. Využití k osvětlování velkých ploch jako jsou výrobní haly a sportoviště.

5.2.1 Měření jasu a spektrální analýza za pomoci goniofotometru

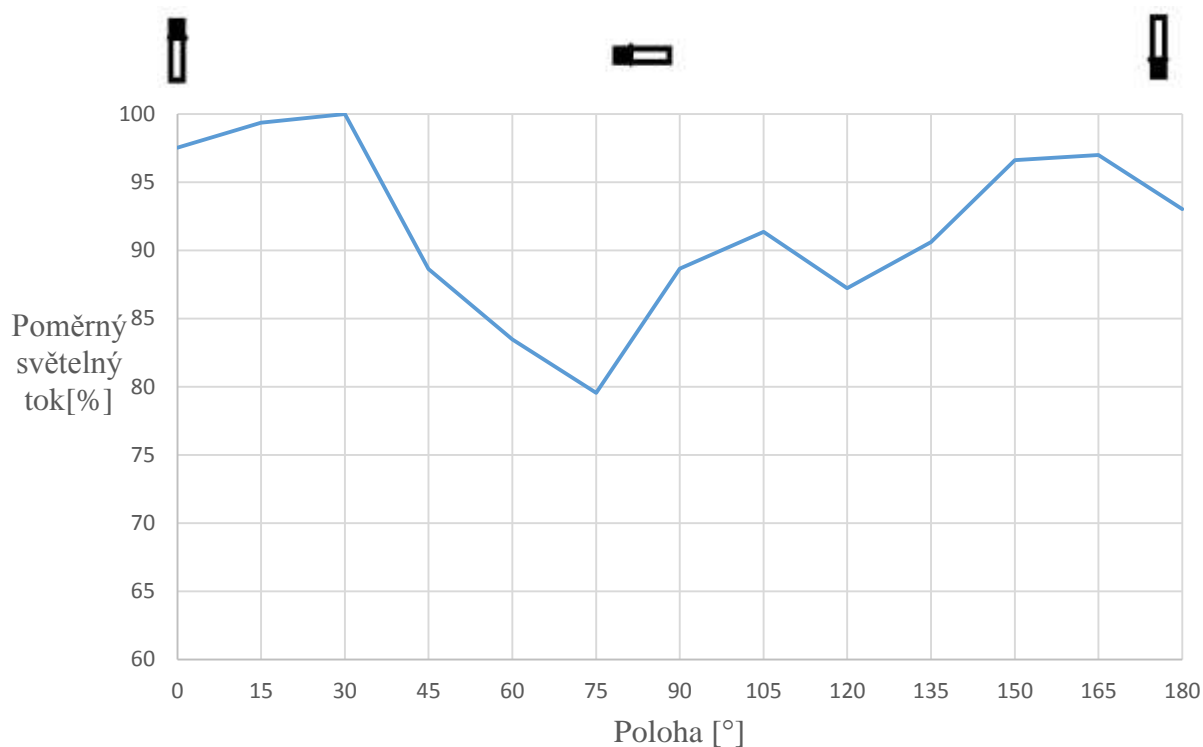
Pracoviště pro dané měření je zobrazeno na *Obr. 5-6*. Pro změnu polohy byl využit goniofotometr se speciálním nástavcem pro měření světelných zdrojů s paticí. Poloha 0° udává pozici, kdy je výbojka ve vertikální poloze s paticí dole. Další pracovní polohy se liší vždy o 15° vzhledem k předešlé poloze. Pro měření spektra výbojky byl využit spektrální analyzátor UPRTEK MK 356, který dokáže určit i přibližnou hodnotu intenzity osvětlení a zní lze odvodit světelný tok. Pro jasovou analýzu byl použit stejně jako pro lineární zářivku fotoaparát Nikon D90 a program LumiDISP. K napájení výbojky bylo využito autotransformátoru a univerzálního předřadníku pro měření výbojek. Před prvním měřením byla výbojka hodinu rozsvícená z důvodu rozechřátí a ustálení vyzařovaného záření. Po změně polohy, byl výbojce ponechán časový interval 20 min k ustálení vyzařovaných parametrů před měřením [23].



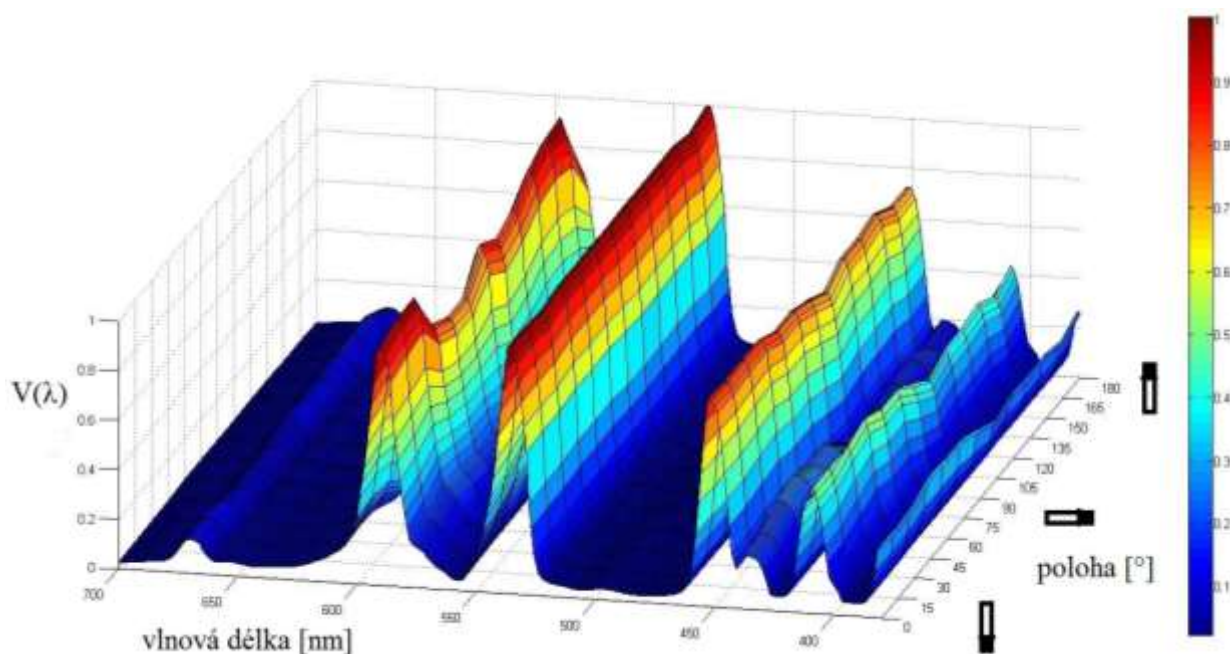
Obr. 5-6 Rozmístění přístrojů pro snímání jasů a změny rozložení spektra halogenidové výbojky (1.fotoaparát Nikon D90, 2.spektrometr UPRTEK MK 356, 3. zkoumaný objekt, 4. goniofotometr)

5.2.1.1 Výstupy spektrální analýzy

Spektrální analýza prokázala, že změna pracovní pozice má velký vliv na vyzařovaný světelný tok. Pokles světelného toku může dosáhnout až dvaceti procent, jak je patrné z *Obr. 5-7*, a to v pracovní pozici 75° . Z pohledu spektra výbojky má na tomto poklesu největší podíl oranžová barva, což dokazuje charakteristika na *Obr.5-8*. Dále jsou zde vidět drobné poklesy v modré části oblasti spektra. Podíl zelené části spektra se nemění, z toho lze usoudit, že na něj změna pracovní polohy nemá vliv.



Obr. 5-7 Závislost poměrného světelného toku na pracovní poloze halogenidové výbojky

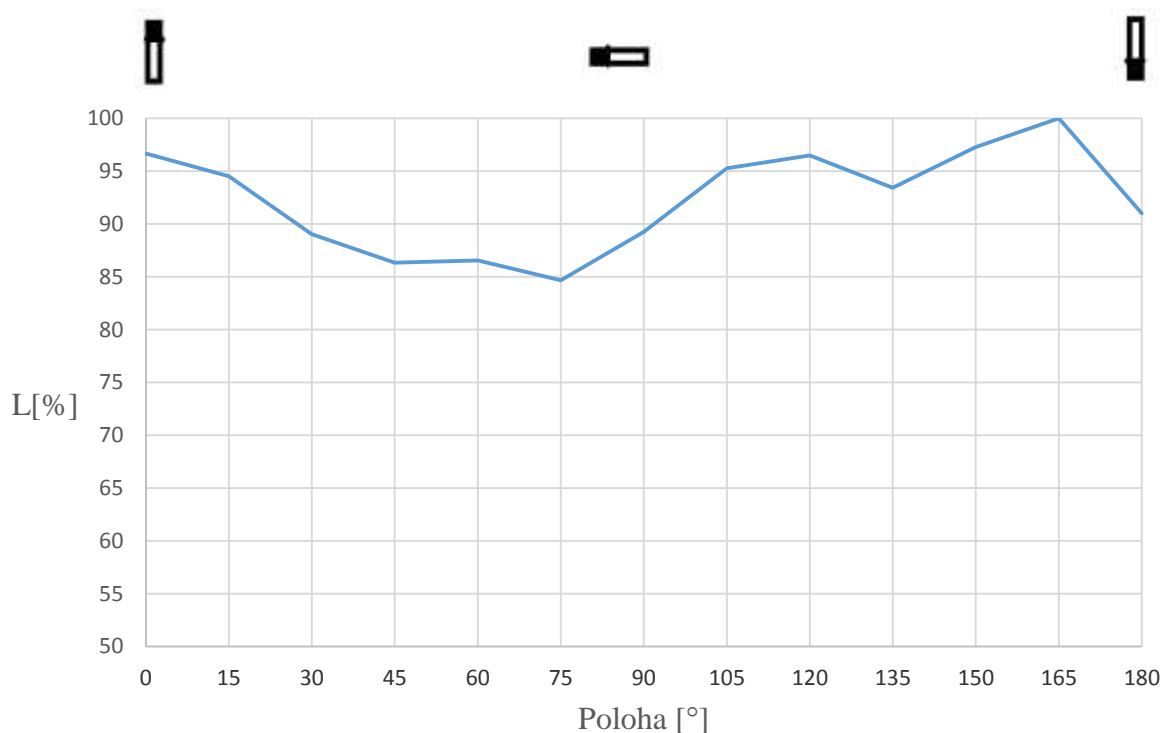


Obr. 5-8 Změna průběhu spektra halogenidové výbojky v závislosti na pracovní poloze

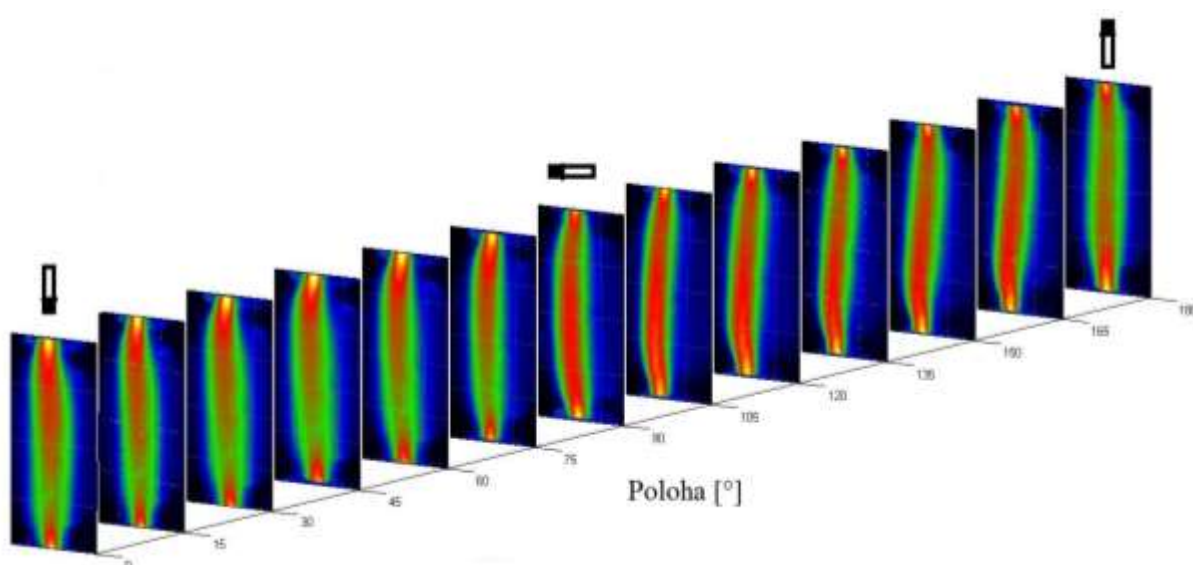
5.2.1.2 Výstupy jasové analýzy

Průběh jasu v závislosti na pracovní poloze uvedený na Obr. 5-9 je podobný průběhu světelného toku. Největší pokles nastává při poloze 75° přibližně o patnáct procent. Pokles je způsoben odklonem oblouku ke stěně hořáku, ten prokazuje Obr. 5-10. Vznik odklonu k horní stěně hořáku je způsoben rozložením teploty, kdy v horní teplejší části hořáku jsou lepší podmínky pro hoření oblouku. Odklon způsobí zvětšení proudové dráhy a následné zvětšení

dynamického odporu oblouku a změnu tlaku v hořáku. Podle jouleova zákona vzniknou ve výboji větší tepelné ztráty a zmenší se podíl světelné emise. [24]



Obr. 5-9 Závislost poměrného jasů na pracovní poloze halogenidové výbojky



Obr. 5-10 Změna průběhu výboje halogenidové výbojky v závislosti na pracovní poloze

Z Obr 5-10 lze pozorovat nerovnoměrnost rozložení vyzařovaného jasů. Nejintenzivnější jas je vždy tam, kde se nachází oblouk. Dále je patrné, že v části, kde se nenachází patice, je intenzita vyzařovaného jasů vyšší než na opačné straně výbojky.

5.2.2 Celkové zhodnocení naměřených charakteristik pro zkoumanou halogenidovou výbojku

Fotometrické parametry proměřené halogenidové výbojky jsou silně závislé na změně její pracovní polohy. Pokles světelného toku je až dvacet procent, pokles jasu okolo 15 procent. Ze vztahů (3.2), (3.3) a (3.7) vyplývá, že svítivost, osvětlenost a světlení jsou přímo úměrné světelnému toku. Z toho můžeme odvodit, že průběhy pro svítivost, osvětlenost a světlení v závislosti na pracovní poloze budou shodné s průběhem světelného toku a pokles bude taktéž kolem 20 procent. Zjištěné poklesy jsou způsobeny změnou průběhu výboje v závislosti na pracovní poloze. Nejideálnější rozložení výboje je ve vertikální pozici. V případě vertikální polohy s paticí nahoře dochází k úniku tepla přes patici, to vede ke snížení tlaku a následnému poklesu světelného toku i jasu jak je patrné z *Obr 5-7* a *Obr. 5-9*. Z výstupu měření vyplývá, že vertikální pracovní poloha je vhodnější pro provoz výbojky než horizontální pracovní poloha. Toto zjištění nepotvrzuje data výrobce, který doporučuje vodorovnou pracovní polohu.

5.3 Měření světelného toku obyčejné žárovky

Měření mělo za úkol prověřit, jak velký bude pokles světelného toku obyčejné žárovky. A to pro pozici s paticí umístěnou nahoře. Měření bylo provedeno v kulovém integrátoru. Pro měření žárovky s paticí nahoře bylo jako držáku využito přírodního kabelu. Pro pozici s paticí dole byla jako držák využita tyč s přípravkem na umístění žárovky.

Zkoumaný objekt

Obyčejná žárovka Tesla s příkonem 150 W. Předepsaný světelný tok má 2140 lm. Životnost dosahuje až 1000 hodin. Řadí se do teplotních světelných zdrojů.

5.3.1 Zhodnocení měření

Jak popisuje *Tab. 5-2*, nastalý pokles světelného toku je pouze kolem tři procent. Tento výsledek dokazuje teoretický předpoklad, že vliv pracovní polohy na fotometrické parametry teplotních světelných zdrojů je nepatrný. V případě obyčejné žárovky by nenastala výrazná změna naměřených parametrů ani po umístění do svítidla, protože pracuje s vysokou provozní teplotou. Při porovnání *Tab. 5-2* a *Tab. 5-3* je patrné, že na kompaktní zářivku má změna polohy větší vliv než na obyčejnou žárovku. Pracuje při nižších provozních teplotách, proto je náchylnější na změnu teploty způsobenou prouděním přes patici.

Tab. 5-2 Světelný tok obyčejné žárovky 150 W

Umístění patice	Světelný tok [lm]	Světelný tok [%]
nahoře	2099	97
dole	2158	100

Tab. 5-3 Světelný tok kompaktní zářivky 65 W (hodnoty převzaty z [25])

Umístění patice	Světelný tok [lm]	Světelný tok [%]
nahoře	3129,5	94,2
dole	3321,8	100

Tab. 5-4 Světelný tok proměřených zářivek v základních pracovních polohách (hodnoty převzaty z [25])

Pracovní poloha	Vertikální	Horizontální
Světelný zdroj	Světelný tok [%]	Světelný tok [%]
Philips TL5 Circular 60W/830	100	99,7
Philips TL5 Circular 40W/830	100	98,5
Osram Lumilux T8 L 30W/865	95	100
Osram T5 FH 28W/840 HE	100	97,5

6 ZÁVĚR

První část práce shrnuje všeobecné poznatky o fotometrických parametrech záření a o jejich způsobech měření. Vyplývá z ní, že nejvýstižnějším zástupcem hodnocení jakosti záření je světelný tok. Z něj lze přibližně odvodit velká část fotometrických veličin záření.

Druhá část práce je zaměřena na rozbor světelných zdrojů, a to jak na princip funkce, tak na jejich konstrukci. Tyto parametry mají zásadní vliv na předpokládaný vliv pracovní polohy světelného zdroje na jeho fotometrické parametry. S ohledem na princip funkce je největší předpoklad změn u světelných zdrojů, u nichž dochází k vzniku záření za pomoci výbojů. Vyplývá to z faktu, že výboj není konstantní a ucelený a může se měnit jeho intenzita a poloha. Výbojové světelné zdroje pracují s plynnou náplní a při určitém pracovním tlaku. Změnou tlaku nastane změna intenzity výboje. Tlak je závislý na provozní teplotě, a ta se bude v závislosti na poloze v určitých částech zdroje měnit. Vzhledem ke konstrukčním parametrům jsou světelné zdroje s paticí závislé na poloze z důvodu odchodu tepla přes ni. Proto byly pro praktickou část vybrány světelné zdroje, u kterých je předpoklad zmíněných problémů.

Praktická část se zabývá zkoumáním vlivu pracovní polohy na fotometrické parametry světelných zdrojů, a to lineární zářivky Osram T5 FH 28 W/840 HE, vysokotlaké halogenidové výbojky Philips HPI-T 400W a obyčejné žárovky Tesla 150W. Dále pak zjištěním poklesu světelného toku v závislosti na poloze u Osram Lumilux T8 L 30W/865, Philips TL5 Circular a kompaktní zářivky 65W.

6.1 Shrnutí poznatků a doporučení k provozu světelných zdrojů

Při provozu uvažujeme základní pracovní polohy, vertikální a horizontální. Popřípadě pro světelné zdroje s paticí pracovní polohy horizontální, vertikální s paticí dole a vertikální s paticí nahore. Vypsání polohy jsou nejvhodnější pro praktické využití.

Pro proměřenou lineární zářivku Osram T5 FH 28 W/840 HE byl zjištěn minimální dopad změny pracovní polohy na vyzařované fotometrické parametry. Nejvhodnějším ukazatelem je pokles světelného toku, který nastal v horizontální pracovní poloze zářivky, přibližně dvě a půl procenta. S ohledem na rozložení teploty po trubici zářivky bych pro provoz jako nejvhodnější doporučil horizontální pracovní polohu, a to i přes zjištěný pokles světelného toku. Tento závěr lze aplikovat i na lineární zářivku Osram Lumilux T8 L 30W/865 uvedenou v *Tab. 5-4*. Ta potvrzuje teoretický předpoklad dopadu oteplení na pokles světelného toku ve vertikální poloze. S ohledem na předešlé závěry, považuji pro všechny typy lineárních zářivek ideální horizontální pracovní polohu pro jejich provoz. Kruhové zářivky Philips TL5 Circular je vhodné použít v jakékoli poloze bez výraznější změny fotometrických parametrů. Kompaktní zářivka má ideální vyzařované parametry ve vertikální pracovní poloze s paticí dole. Tato poloha není ideální vzhledem k umísťování světelných zdrojů do svítidel. Častěji se využívá horizontální pracovní poloha nebo vertikální pracovní poloha s paticí nahore. Z těchto praktičtějších variant bych doporučil horizontální pracovní polohu, a to z důvodu zmenšení úniku tepla přes patici [25].

Zkoumaná vysokotlaká halogenidová výbojka Philips HPI-T 400W má v horizontální pracovní poloze pokles světelného toku až o 20%, proto bych tuto pozici pro provoz nedoporučil. Ideální

vyzařovací vlastnosti má ve vertikální pracovní poloze s paticí dole z důvodu nejlepšího rozložení výboje v hořáku, to platí obecně pro všechny typy vysokotlakých výbojek. Z daného důvodu bych pro celou skupinu vysokotlakých výbojových zdrojů doporučil vertikální pracovní polohu s paticí dole. Výjimkou je sodíková vysokotlaká výbojka, ta v této poloze nesmí pracovat a má předepsané polohy svícení, a proto pro ni není nutné určovat její závislost na pracovní poloze.

Obyčejná žárovka Tesla 150W vykazuje pokles světelného toku v závislosti na poloze okolo 3 %, a to ve vertikální pozici s paticí nahoře. Tento pokles považuji za zanedbatelný a doporučil bych pro ni libovolnou pracovní polohu. Obecně lze tento fakt shrnout na všechny typy teplotních světelných zdrojů, není-li u nich předepsána pevná pracovní poloha.

Elektroluminiscenční světelné zdroje jsou už z principu funkce polohově nezávislé. Proto pro ně lze doporučit libovolnou polohu svícení s tím předpokladem, že PN přechod bude řádně uchlazen.

6.2 Návrh dalšího postupu

Pro proměřené světelné zdroje by bylo příhodné proměřit jejich parametry po uzavření do svítidla, hlavně pro lineární zářivku Osram T5 FH 28 W/840 HE. U ní vyvstává otázka, zda by se její vyzařované parametry v závislosti na pracovní poloze vlivem oteplení ve svítidle změnily, nebo by se vytvořily ve svítidle konstantní podmínky a vyzařované parametry by zůstaly stejné.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HABEL, J. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění*. 2. vyd. Praha: Prometheus, 1994, 133 s. ISBN 80-719-6087-X.
- [3] WIKIPEDIE. Otevření encyklopedie. *Elektromagnetické spektrum*. [online]. [cit. 2014-12-15], http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetické_spektrum
- [4] SOKANSKÝ, K., NOVÁK, T., BÁLSKÝ, M., BLÁHA, Z., CARBOL, Z., DIVIŠ, D., SOCHA, B., ŠNOBL, J., ŠUMPICH J., ZÁVADA, P. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [5] LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia: Optika*. 2. vyd. Praha: Prometheus, 1995, 167 s. ISBN 80-858-4971-2.
- [6] Okem (řez). *Biologie člověka* [online]. Gymnázium a Střední odborná škola pedagogická, Znojmo, 2006 [cit. 2014-12-15], http://ms.gsospg.cz:5050/bio/Sources/Photogallery_Detail.php?intSource=1&intImageId=287
- [7] DOBIÁŠ, J. *Hodnocení optických prvků pro LED*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Škoda, Ph.D.
- [8] WIKIPEDIE. Otevření encyklopedie. *Prostorový úhel*. [online]. [cit. 2014-12-15], http://cs.wikipedia.org/wiki/Prostorovy_uhel
- [9] HRBÁČEK, M. *Luxmetr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc
- [10] OSRAM.cz. *Produkty - světelné zdroje: CLASIC ECO SUPERSTAR A* [online]. [cit. 2014-12-15], http://www.osram.cz/osram_cz/produkty/svetelne-zdroje/halogenove-zarovky/halogen-classic-eco/classic-eco-superstar-a/index.jsp
- [11] WIKIPEDIE. Otevření encyklopedie. *Žárovka*. [online]. [cit. 2014-12-15], <http://cs.wikipedia.org/wiki/zarovka>
- [12] MIŠKAŘÍK, S. *Elektrické zdroje světla (učební texty)*. Praha : LUMAX, 1992.117s.
- [13] MÚDRY, P. *Vliv polohy světelného zdroje na jeho provozní parametry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
- [14] KUPTSOV, A. *Změna parametrů výbojových světelných zdrojů s frekvencí napájecího proudu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 49 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Krbal.

- [15] MIŠKAŘÍK, S. *Moderní zdroje světla*. 1. vyd. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1979 . 251 s.
- [16] PRACHAŘ, P. *Elektronický předřadník pro vysokotlaké výbojky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 40 s., 19 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. Roman Šotner, PhD.
- [17] PHILIPS. Lighting Catalog. 2013. 163 s.,
http://www.usa.lighting.philips.com/connect/tools_literature/downloads/sg100-2013.pdf
- [18] OSRAM.cz. *Produkty - světelné zdroje* [online]. [cit. 2014-12-15],
http://www.osram.cz/osram_cz/produkty/svetelne-zdroje/specialni-svetelne-zdroje/index.jsp
- [19] BAXANT, P., DRÁPELA, J. *Světelná technika: Laboratorní cvičení*. Skriptum. 53 s. [cit. 2012-10-11].
- [20] MIELCZARSKI, W. ; MICHALIK, G. ; LAWRECE, W.B. ; GABRYJELSKI, Z. 8th *International Conference on Harmonics and Quality of Power* 1998, Vol.2, pp.1200-1205,
- [21] BAXANT, P, SUMEC, S. *LumiDISP* [online]. [cit. 2015-5-20],
<http://www.lumidisp.eu>
- [22] HABEL, J. *Základy světelné techniky (3)* Časopis SVĚTLO 2/2009 dostupné online
<http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-3--15628>
- [23] ŠTĚPÁNEK, J. *Měření vlastností výbojkových zdrojů* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2012.
- [24] ŠKODA, J.; BAXANT, P.; PAVELKA, T.; KRBAL, M.; SUMEC, S. *Analysis of Discharge Lamp Luminance Depending on Position*. V *ELECTRIC POWER ENGINEERING* 2011. 1. Ostrava, VSB – Technická univerzita Ostrava. 2011. p. 1 - 3. ISBN 978-80-248-2393-5.
- [25] ŠKODA, J, ŠTĚPÁNEK, J, *Dependence of Luminous Flux on Light Source Position* V *ELECTRIC POWER ENGINEERING* 2011. 1. Ostrava, VSB - Technická univerzita Ostrava. 2015. ISBN 978-1-4673-6787-5

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A-1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro měření lineární zářivky
- Příloha A-2: Snímky lineární zářivky pořízené termokamerou
- Příloha A-3: Rozložení jasu na lineární zářivce
- Příloha B-1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro měření halogenidové výbojky
- Příloha B-2: Průběhy spektra halogenidové výbojky v závislosti na změně pracovní polohy
- Příloha B-3: Změny rozložení jasu v řezech halogenidové výbojky v závislosti na pracovní poloze
- Příloha DVD: Naměřené a zpracované hodnoty, animace atd...

Příloha A - 1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro měření lineární zářivky (Osram T5 FH 28 W/840 HE)

Tab. P. 1. Vypočítané hodnoty pro měření světelného toku zářivky

Poloha [°]	Světelný tok [lm]	Světelný tok [%]
0	2718,5	100,0
45	2666,3	98,1
90	2649,3	97,5
135	2681,4	98,6
180	2703,5	99,5

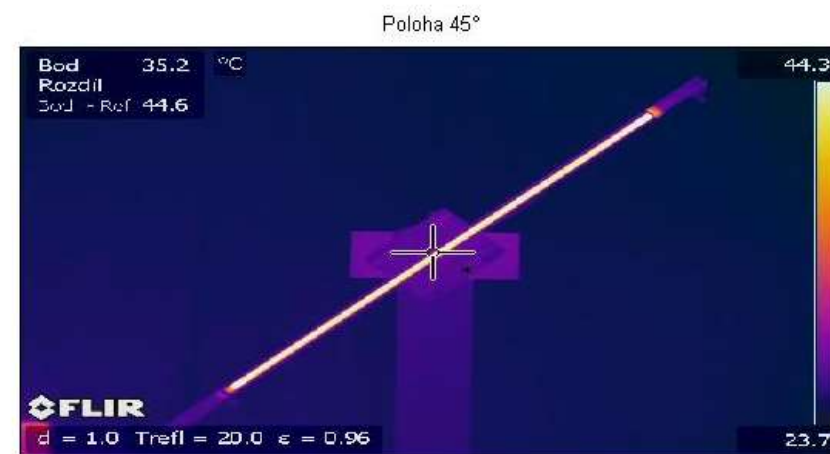
Tab. P. 2. Naměřené a vypočítané hodnoty pro jas v řezu zářivky

Poloha [°]	Jas [cd/m^2]	Jas [%]
0	26704,2	98,4
15	26993,3	99,5
30	26193,5	96,5
45	26316,1	97,0
60	26794,3	98,7
75	27142,4	100,0
90	26388,0	97,2
105	26347,0	97,1
120	26101,2	96,2
135	25878,2	95,3
150	26062,8	96,0
165	26098,6	96,2
180	26798,6	98,7

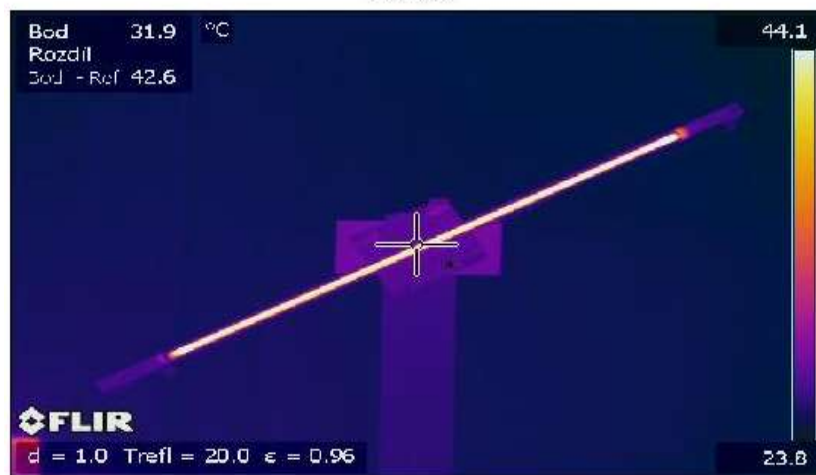
Tab. P. 3. Naměřené a vypočítané hodnoty pro snímání teploty zářivky

poloha [°]	teplota [°C]	teplota [%]
0	46,7	98,7
15	45,0	95,1
30	44,5	94,1
45	44,3	93,7
60	44,1	93,2
75	44,2	93,4
90	45,2	95,6
105	45,1	95,3
120	45,9	97,0
135	45,5	96,2
150	46,2	97,7
165	47,3	100,0
180	46,7	98,7

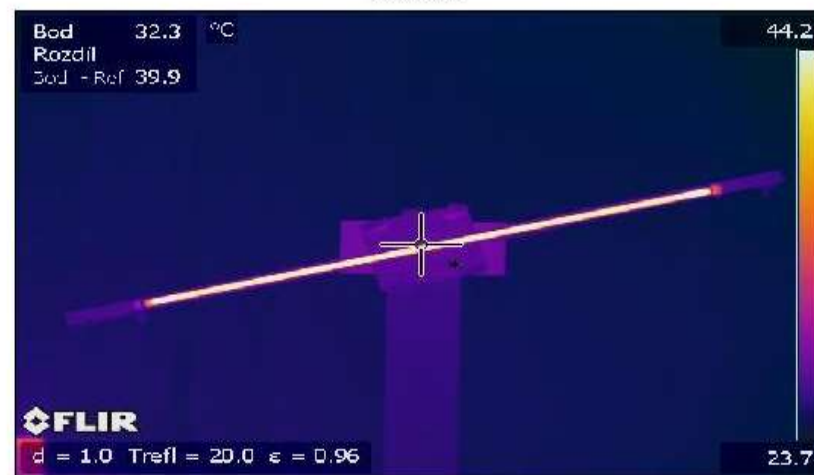
Příloha A - 2: Snímky lineární zářivky pořízené termokamerou (Osram T5 FH 28 W/840 HE)



Poloha 60°



Poloha 75°



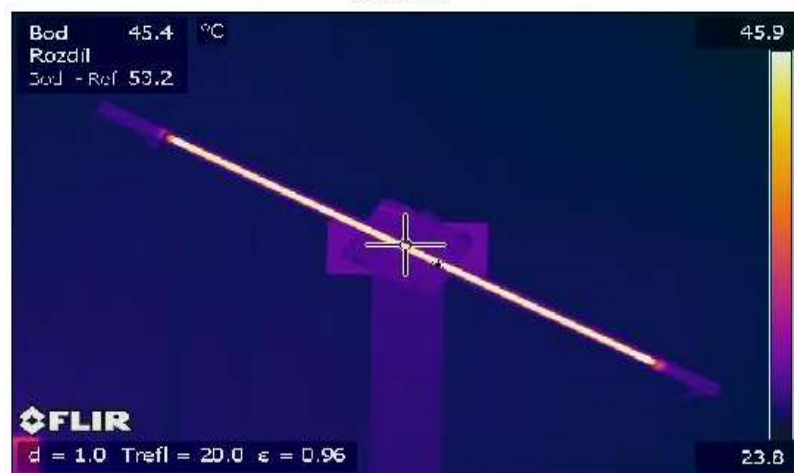
Poloha 90°



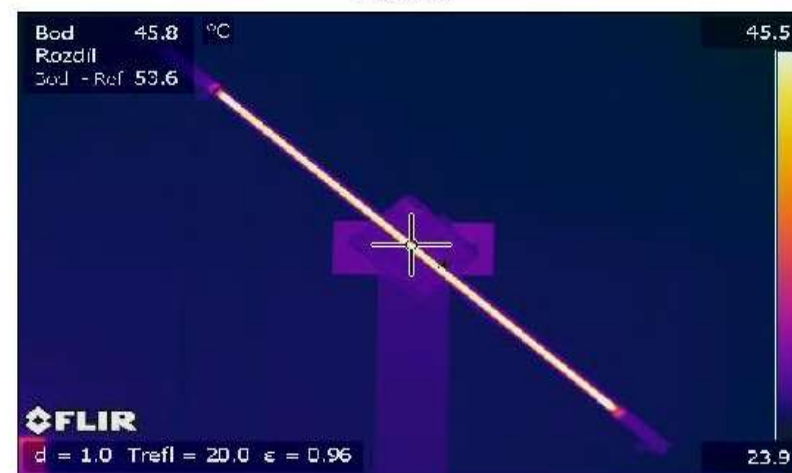
Poloha 105°



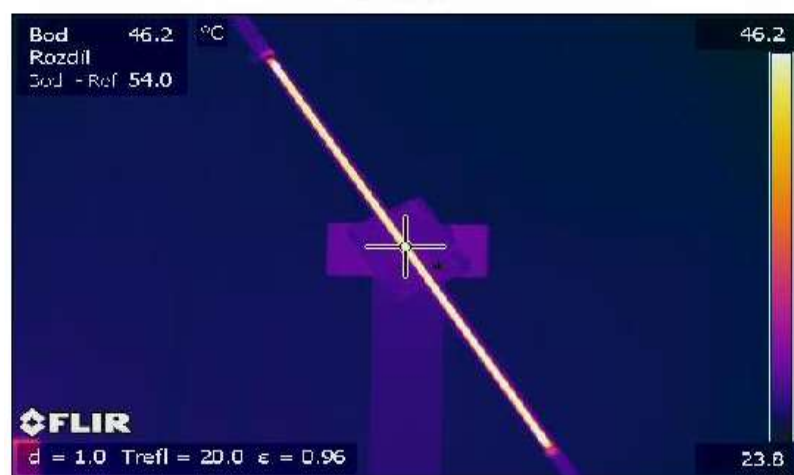
Poloha 120°



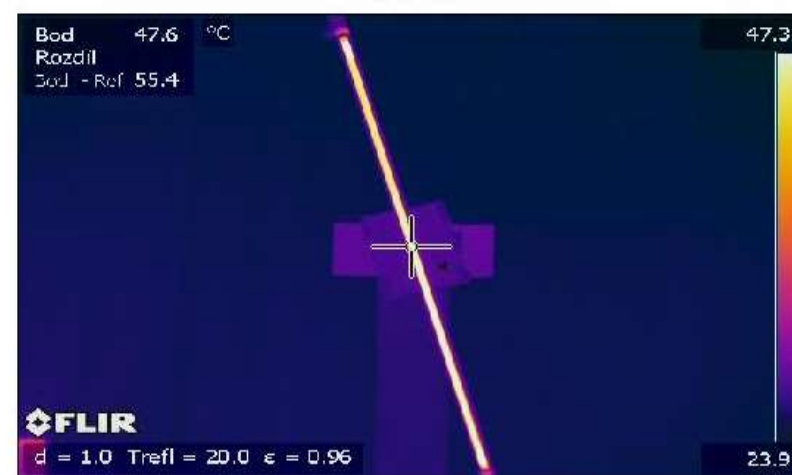
Poloha 135°

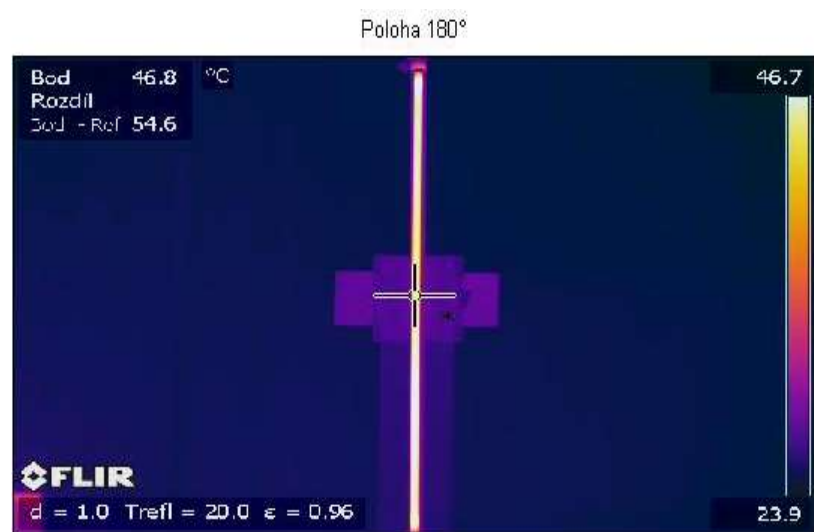


Poloha 150°

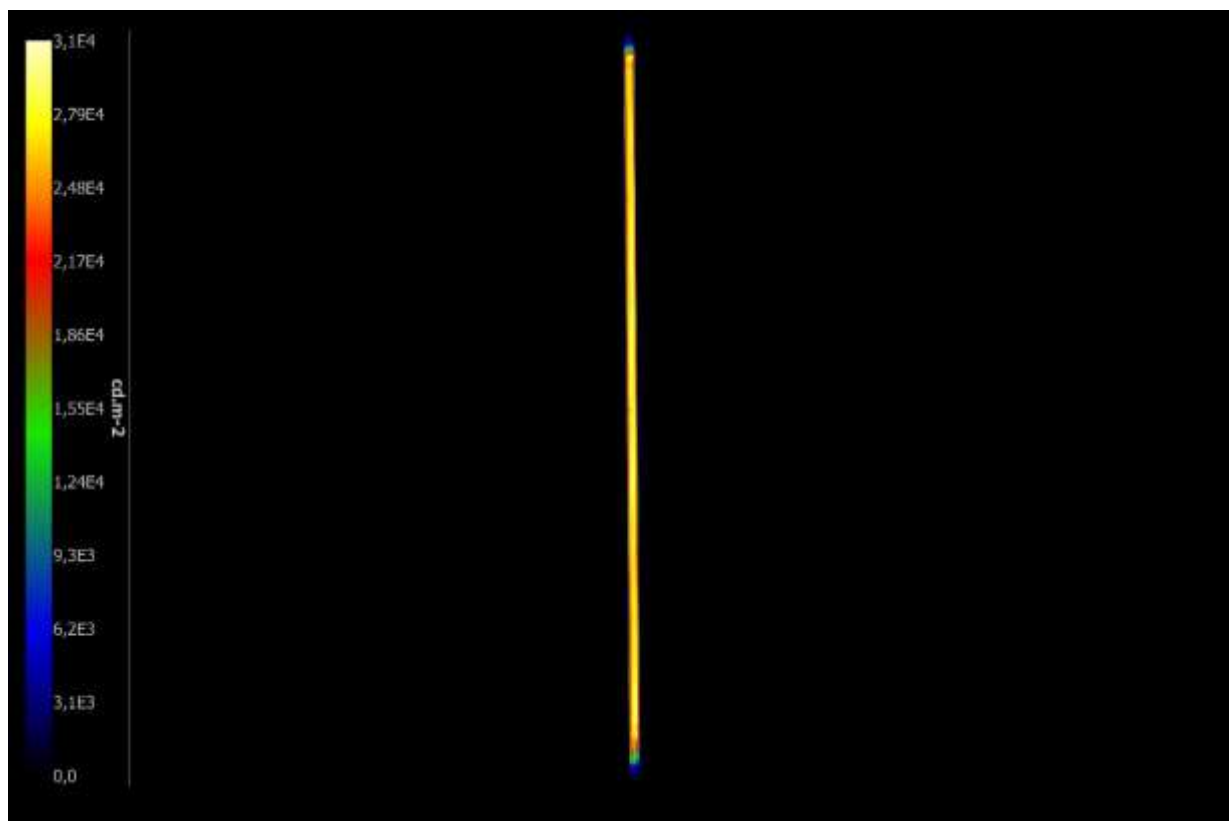


Poloha 165°





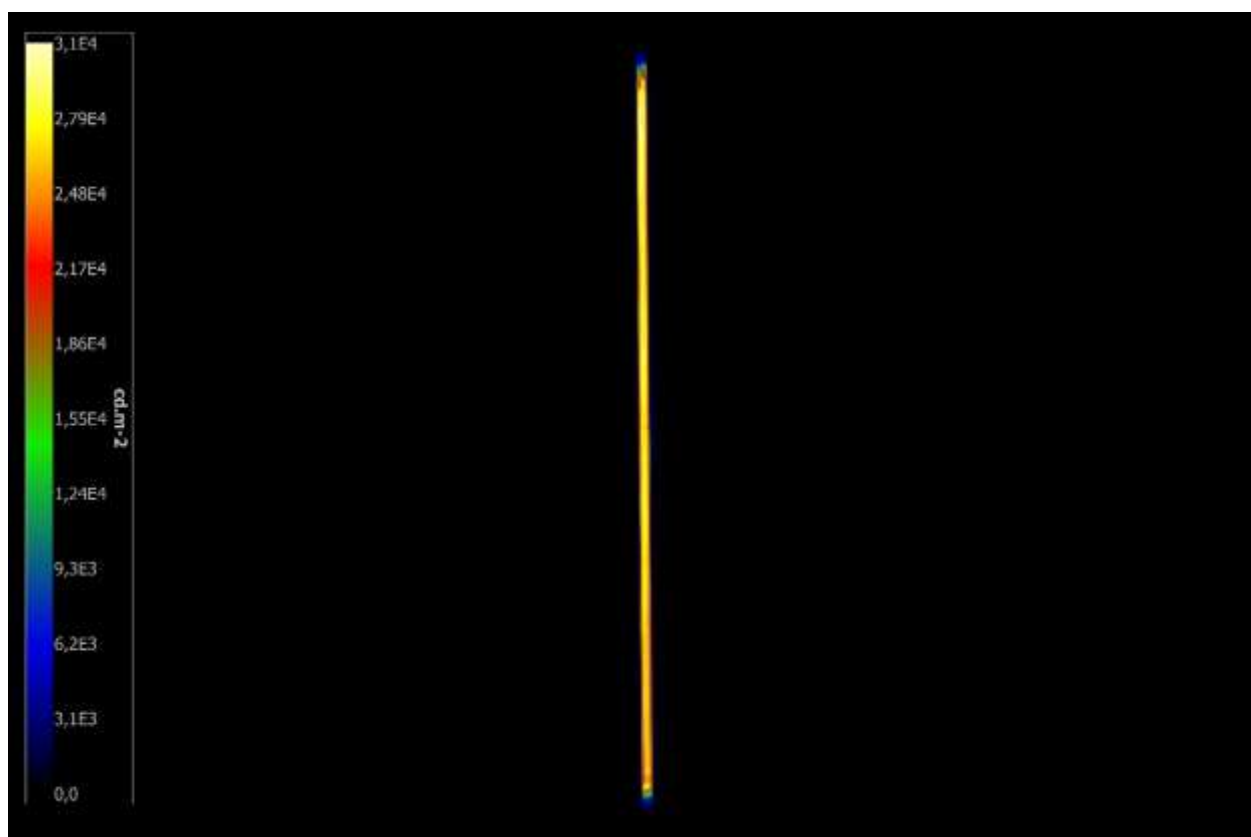
Příloha A - 3: Rozložení jasů na lineární zářivce v základních pracovních polohách (Osram T5 FH 28 W/840 HE)



Obr. P. 1. Rozložení jasů v poloze 0° (potisk nahoře)



Obr. P. 2. Rozložení jasu v poloze 90°



Obr. P. 3. Rozložení jasu v poloze 180° (potisk dole)

Příloha B - 1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro měření halogenidové výbojky (Philips HPI-T 400W)

Tab. P. 4. Poměrný světelný tok v závislosti na pracovní poloze halogenidové výbojky

Poloha[°]	E [lx]	Světelný tok [%]
0	4232,3	97,5
15	4312,1	99,4
30	4339,6	100,0
45	3846,6	88,6
60	3622,2	83,5
75	3451,9	79,5
90	3847,8	88,7
105	3965,0	91,4
120	3784,9	87,2
135	3931,6	90,6
150	4192,9	96,6
165	4209,5	97,0
180	4036,6	93,0

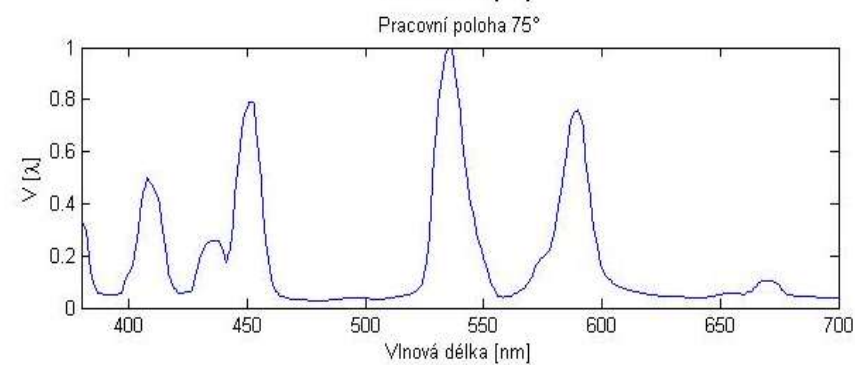
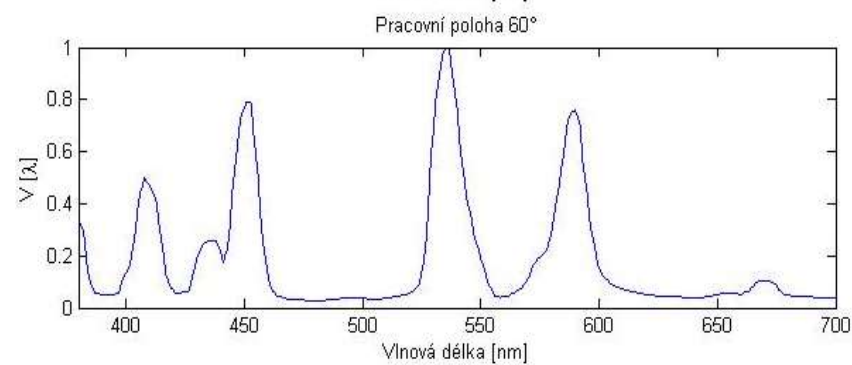
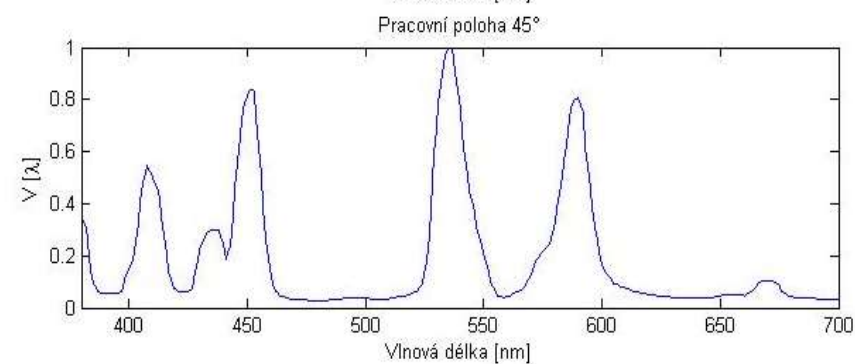
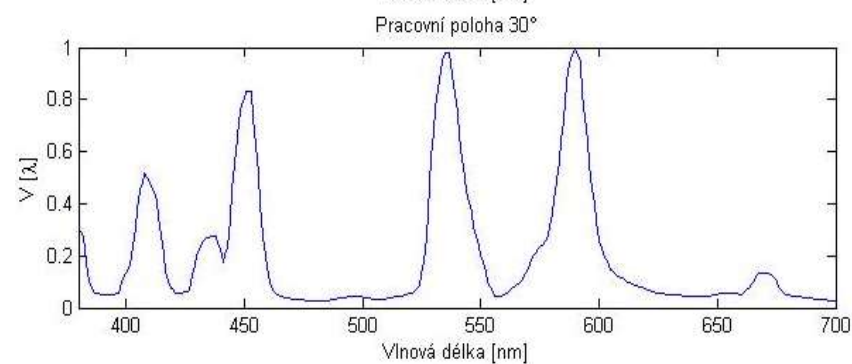
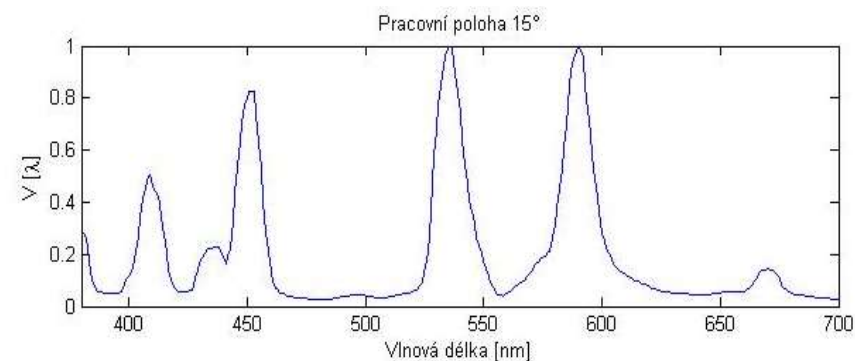
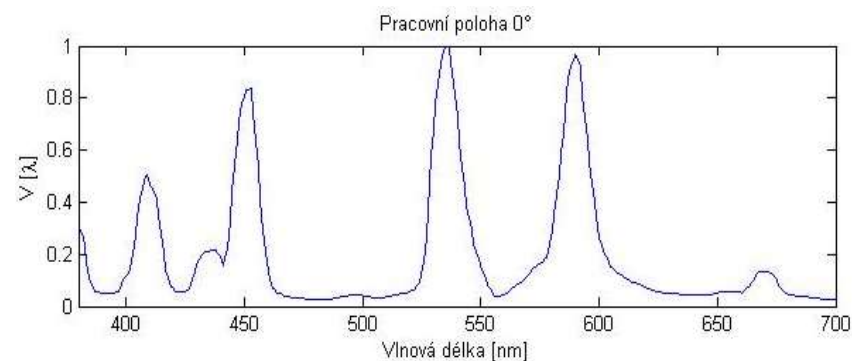
Tab. P. 5. Poměrný jas v závislosti na pracovní poloze halogenidové výbojky

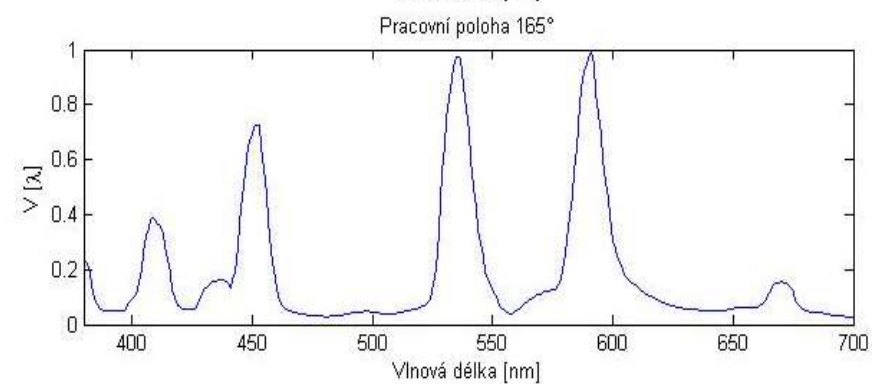
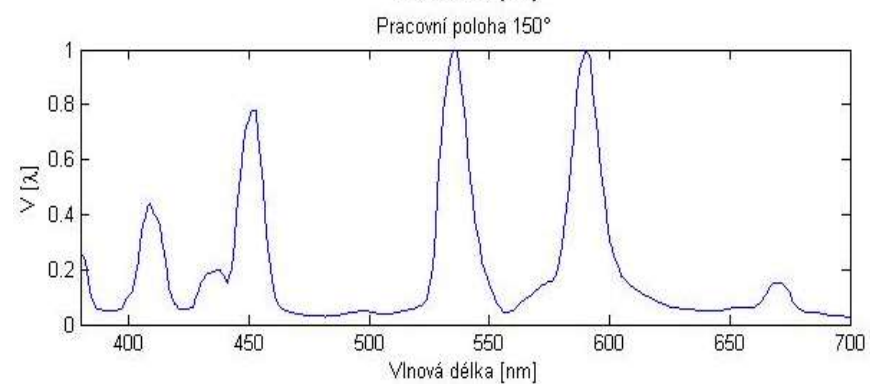
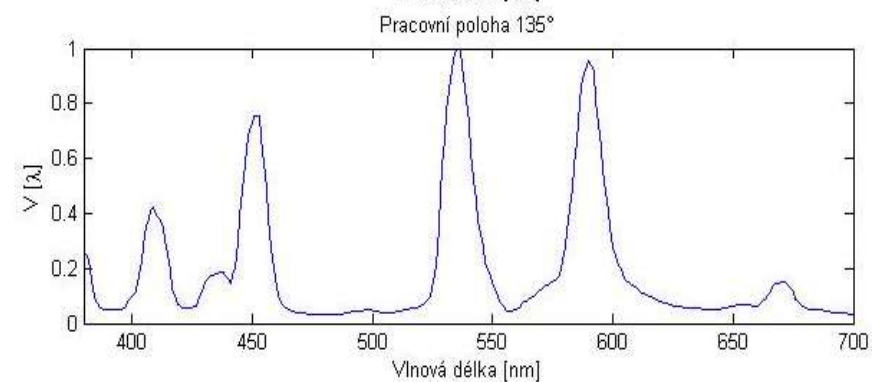
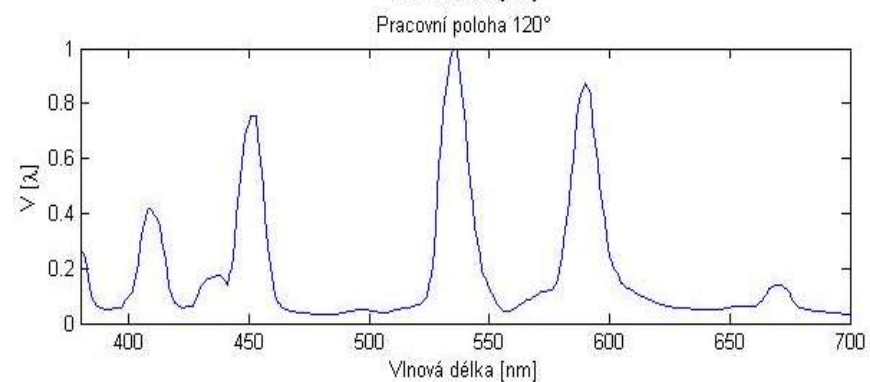
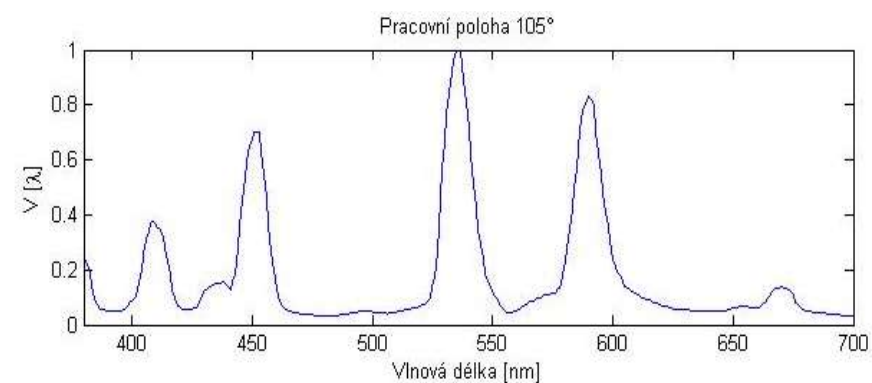
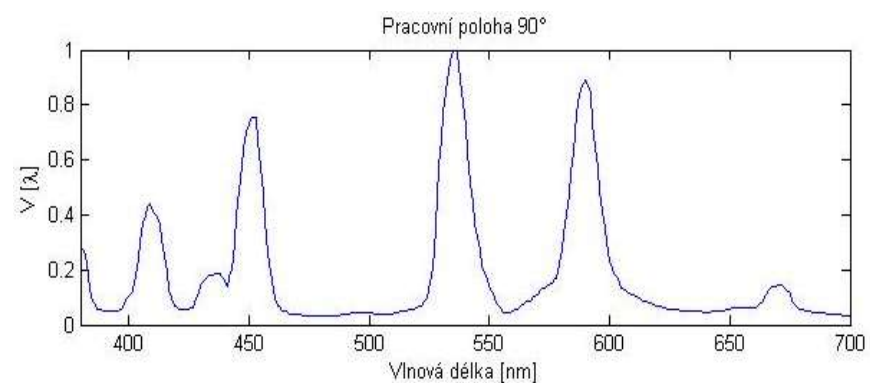
Poloha [°]	Jas [cd/m ²]	Jas [%]
0	2866103,3	96,7
15	2801667,2	94,5
30	2639807,9	89,0
45	2559331,1	86,3
60	2565971,2	86,6
75	2509710,2	84,7
90	2646141,6	89,3
105	2824342,8	95,3
120	2860196,8	96,5
135	2769500,0	93,4
150	2883433,3	97,3
165	2964506,3	100,0
180	2697632,3	91,0

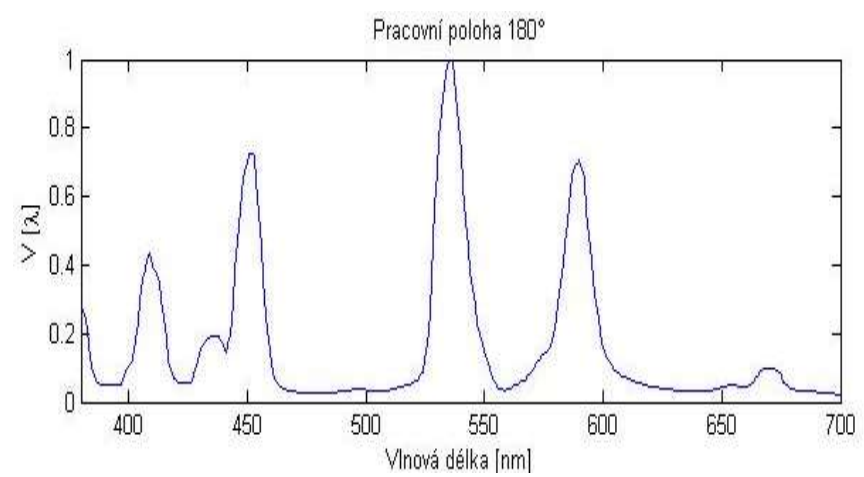
Tab. P. 6. Hodnoty poměrného jasu v řezech pro halogenidovou výbojku

Poloha [°]	Hodnota poměrného jasu [%]					
	V1	V2	V3	H1	H2	H3
0	41,9	89,2	100,0	79,0	95,6	100,0
15	60,0	79,3	85,6	77,9	95,1	99,1
30	60,9	73,2	61,4	74,3	87,8	92,3
45	49,2	79,9	60,8	75,1	83,6	86,7
60	70,0	78,3	54,7	72,6	84,5	88,6
75	70,9	75,7	38,0	71,7	83,1	90,1
90	82,1	72,5	37,5	92,3	81,2	87,6
105	75,5	72,1	34,1	94,4	97,2	88,4
120	100,0	64,9	37,7	96,7	100,0	88,4
135	96,1	73,3	43,0	93,7	95,7	84,1
150	86,4	74,4	50,8	97,1	96,3	91,7
165	49,1	100,0	56,7	100,0	96,3	92,0
180	27,1	94,4	89,3	88,5	85,6	82,6

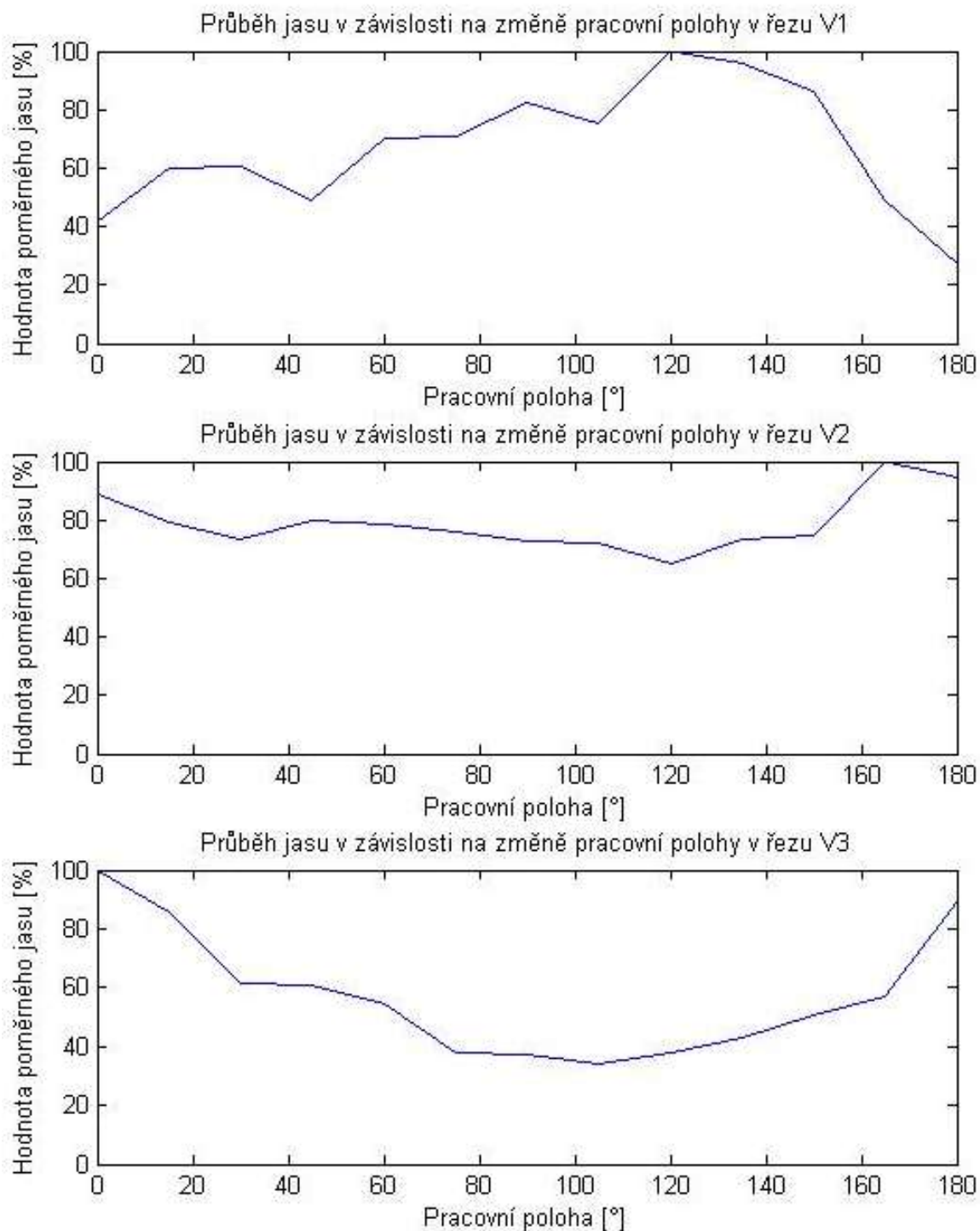
Příloha B - 2: Průběhy spektra halogenidové výbojky (Philips HPI-T 400W)

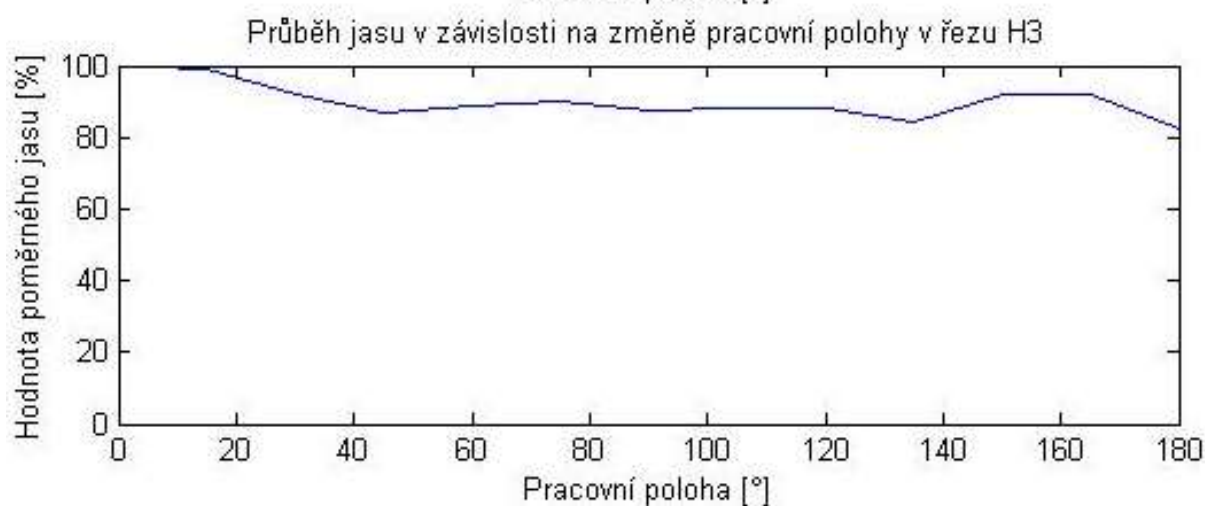


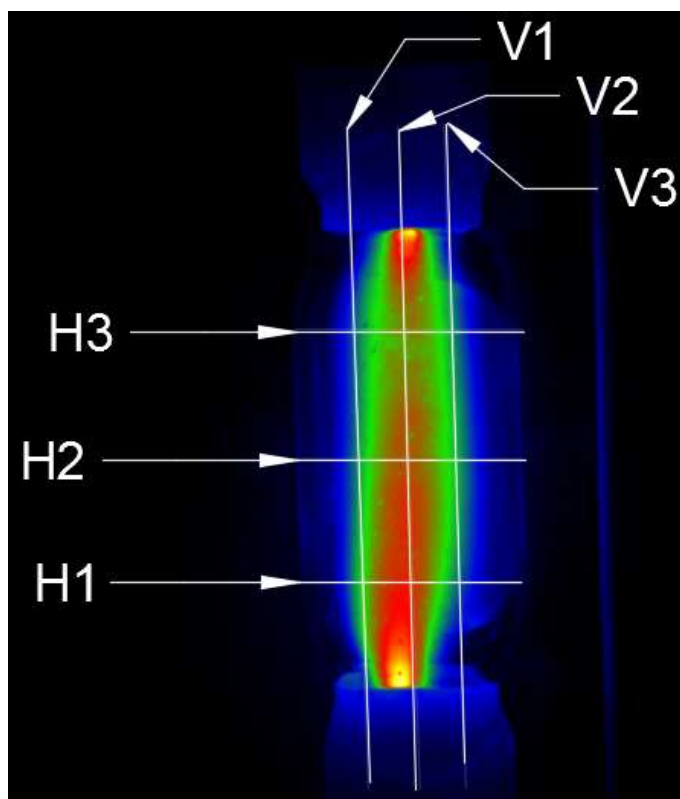




Příloha B - 3: Změny rozložení jasu v řezech pro halogenidovou výbojku (Philips HPI-T 400W)







Obr. P. 4. Rozmístění řezných os